Henry Marion Howe

ЖЕЛѢЗО, СТАЛЬ

И

ДРУГІЕ СПЛАВЫ.

HENRY MARION HOWE, L.L. D.
ПРОФЕССОРЪ МЕТАЛЛУРГІИ COLUMBIA UNIVERSITY
ВЪ НЬЮ ІОРКѢ.

ЖЕЛѢЗО, СТАЛЬ И ДРУГІЕ СПЛАВЫ

ПЕРЕВОДЪ

И. И. ЖУКОВА

СЪ ДОПОЛНЕНІЯМИ И ИЗМѢНЕНІЯМИ АВТОРА КЪ РУССКОМУ ИЗДАНІЮ

С.-ПЕТЕРБУРГЪ
ИЗДАНІЕ А. С. СУВОРИНА
1908

Типографія А. С. Суворина. Эртелевъ, 13

To my friend

Professor Dimitry Constantinovitsch Tschernoff

the father of the metallography of iron

As a token of affectionate esteem this work is dedicated.

Моему другу

Профессору Дмитрію Константиновичу Чернову

отцу металлографіи желѣза

въ знакъ искренняго уваженія посвящается этотъ трудъ.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

Введеніе.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

Кривыя охлажденія.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

Кривыя замерзанія.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

Строеніе бинарныхъ сплавовъ, не образующихъ опредѣленнаго химическаго соединенія.

Причины возникновенія указаннаго строенія.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

Продолженіе изученія кривыхъ бинарныхъ сплавовъ, не образующихъ химическихъ соединеній.

Положеніе кривой насыщенія при различныхъ условіяхъ и ея отношеніе къ кривой замерзанія.

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

Кривыя охлажденія и кривыя замерзанія серій сплавовъ, содержащихъ опредѣленныя химическія соединенія.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

Измѣненіе электропроводиости и другихъ свойствъ въ серіяхъ сплавовъ.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

Металлографія желѣза и стали.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

Тепловая обработка стали и чугуна.

Тепловая обработка стали.

Тепловая обработка чугуна.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

Правило фазъ.

Терминологія правила фазъ.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

Прогрессъ въ металлургіи желѣза и стали между 1880 и 1900 г.

Извлеченіе желѣза изъ руды.

Переработка чугуна на сварочное желѣзо и сталь.

Механическая обработка.

Статистическія данныя.

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

Доменная печь.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

Металлургическія газовыя печи.

ДОБАВЛЕНІЕ ПЕРВОЕ.

ДОБАВЛЕНІЕ ВТОРОЕ.

ДОБАВЛЕНІЕ ТРЕТЬЕ.

ДОБАВЛЕНІЕ ЧЕТВЕРТОЕ.

ОТЪ ПЕРЕВОДЧИКА.

Настоящій переводъ сдѣланъ со второго изданія «Iron, Steel, and other Alloys» Henry Marion Howe'а, профессора металлургіи Columbia University въ Нью-Іоркѣ. Спеціально для русскаго изданія авторомъ были вновь переработаны и дополнены главы о металлографіи желѣза и стали, о тепловой обработкѣ чугуна и о спеціальныхъ сталяхъ. Такимъ образомъ, русское изданіе является болѣе полнымъ и болѣе современнымъ, чѣмъ послѣднее американское изданіе.

Что касается до русскаго изданія, то переводчикъ вынужденъ предпослать нѣсколько объясненій по поводу тѣхъ оборотовъ и выраженій, которые могутъ вызвать упрекъ со стороны читателей.

Во-первыхъ, какъ языкъ, такъ и манера изложенія автора очень своеобразны, и это не могло не отразиться на переводѣ. Ограничиваться простой передачей смысла, не давая болѣе или менѣе точнаго перевода, часто казалось нежелательнымъ, такъ какъ этимъ создавалась опасность не вполнѣ точной передачи мысли автора.

Во-вторыхъ, въ нѣкоторыхъ случаяхъ приходилось прибѣгать къ точному переводу терминовъ, а не пользоваться уже вошедшими въ русскій языкъ, такъ какъ именно эти переводные термины лучше оттѣняютъ точку зрѣнія автора. Нѣкоторые же термины приходилось точно переводить съ англійскаго

вслѣдствіе того, что соотвѣтствующихъ имъ русскихъ терминовъ еще не имѣется.

Переводчикъ приноситъ живѣйшую и искреннѣйшую благодарность профессору Henry M. Howe за любезное разрѣшеніе на переводъ, за указанныя выше добавленія и измѣненія къ русскому изданію и за присылку клише, а также за то вниманіе и помощь, которыми переводчикъ съ его стороны пользовался.

Глубокую благодарность приноситъ переводчикъ также всѣмъ лицамъ, помогавшимъ ему своими указаніями, а въ особенности профессору С.-Петербургскаго Политехническаго института М. А. Павлову за переводъ на русскій языкъ классификаціи желѣза и стали, выработанной международной ассоціаціей по испытанію матеріаловъ, и В. Я. Курбатову, оказавшему большую помощь при чтеніи корректуръ.

На слѣдующей страницѣ помѣщено письмо, полученное переводчикомъ, которое, согласно желанію, выраженному авторомъ, должно служить предисловіемъ къ русскому изданію.

И. Жуковъ.

Ivan Shukoff Esq.

Dear Sir,

I am more than glad that, by your translation, you make this fruit of my labors available to your people towards whom I have always felt deep affection and gratitude, affection for a spiritual and poetic race, gratitude for the moral support which Russia almost alone among the great powers gave my country in her death grapple of the War of the Rebellion. How welcome and uplifting that suppart was in those dark, bitter days, the Americans of my generation can never forget.

For enabling me thus to make my mite of payment towards that great debt which we owe you, I thank you from the bottom of my heart.

Yours faithfully,

Henry M. Howe.

Green Peace
May 1907.

Я болѣе, чѣмъ радъ, что своимъ переводомъ вы дѣлаете этотъ плодъ моихъ трудовъ доступнымъ вашимъ соотечественникамъ, къ которымъ я всегда питалъ глубокую любовь и благодарность—любовь къ одаренной націи, благодарность за ту нравственную поддержку, которую Россія, почти одна только изъ среды великихъ державъ, оказала моей родинѣ въ борьбѣ во время междуусобной войны. Насколько желанной и ободряющей явилась эта поддержка въ тѣ мрачные, тяжелые дни, американцы моего поколѣнія никогда не забудутъ. За доставленіе мнѣ возможности такимъ путемъ внести свою лепту въ уплату того большого долга, которымъ мы обязаны, я благодарю васъ отъ глубины сердца.

Преданный Вамъ

Henry M. Howe.

Green Peace
Май 1907.

Предисловіе автора къ первому изданію.

Неоднородность этой книги вызывается тѣмъ, что послѣдняя предназначается для различныхъ классовъ читателей. Первоначально имѣлись въ виду мои слушатели, для которыхъ она должна была служить дополненіемъ къ лекціямъ и имѣющимся руководствамъ. Поэтому здѣсь разработаны нѣкоторые важные вопросы, въ другихъ руководствахъ недостаточно пространно или даже вовсе не затронутые и не подходящіе для изложенія на лекціяхъ.

Моихъ слушателей можно подраздѣлить по крайней мѣрѣ на три разряда—на тѣхъ, которымъ нужно поверхностное знакомство съ металлургіей,—таковы химики, гражданскіе инженеры, инженеры-электрики и механики; на тѣхъ, которымъ нужно болѣе полное знакомство съ металлургіей,—таковы изучающіе металлургію и горное дѣло; наконецъ,—на спеціально занимающихся этимъ предметомъ, которымъ нужно еще болѣе полное съ нимъ знакомство.

Но самое составленіе книги, приспособленной для этихъ трехъ разрядовъ, давало случай нѣсколько расширить ея рамки и пойти навстрѣчу запросамъ практиковъ, давъ систематическій обзоръ современной металлографіи желѣза, и въ частности изложивъ приложеніе теоріи растворовъ къ металлографіи. Сдѣлать это казалось очень важнымъ, съ одной стороны, потому, что эта теорія впервые даетъ намъ возможность охватить и ясно представить данный предметъ полностью, съ другой же—

потому, что большинство практиковъ, для которыхъ англійскій языкъ является природнымъ, испытываетъ потребность въ болѣе элементарномъ и въ то же время болѣе полномъ изложеніи предмета, чѣмъ доступныя имъ въ настоящее время.

Эти различные разряды читателей приступаютъ къ изученію металлографіи съ очень неодинаковой подготовкой; эта-то различная степень подготовки и заставила прибѣгать къ различнымъ способамъ изложенія, подгоняя ихъ къ предполагаемымъ запросамъ того или иного разряда читателей.

Выражаю живѣйшую благодарность тѣмъ изъ моихъ друзей, которые помогали мнѣ своимъ совѣтомъ и знаніемъ. Въ особенности, искренно благодарю профессора Margaret E. Maltby за просмотръ семи первыхъ и десятой главы, касающихся возникновенія сплавовъ и правила фазъ; Mr. Frank Firmstone за просмотръ главы, посвященной доменной печи; Dr. William Campbell, лектора по металлургіи, за цѣнныя свѣдѣнія, большое число микрофотографій и за самое внушеніе мнѣ мысли написать эту книгу. Хотя, что касается до послѣдняго, то къ моей благодарности примѣшивается нѣкоторая доля упрека.

Моимъ сотрудникамъ я многимъ обязанъ за цѣнную помощь, въ особенности Mr. Bradley Stoughton, преподавателю металлургіи, и Mr. I. C. Bull, ассистенту.

Наибольшей благодарностью я обязанъ моему ассистенту, Mr. R. W. Page, за его усидчивую и полную знанія помощь при подготовленіи и печатаніи этого труда.

Читатель долженъ снисходительно имѣть въ виду ту трудность, которую представляетъ собою въ настоящее время изложеніе металлографіи желѣза, благодаря отрывочности свѣдѣній и быстрому ихъ накопленію по этому предмету.

Стремиться къ тому, чтобы трудъ заключалъ всѣ новѣйшіе результаты въ этой области, это значило бы отложить его опубликованіе до греческихъ календъ.

Н. М. Н.

Columbia University in
the City of New-York.
3 іюня 1903.

Предисловіе къ второму изданію.

Помимо нѣкоторыхъ мелкихъ исправленій и другихъ измѣненій, при подготовкѣ этого изданія мною была добавлена классификація и опредѣленія желѣза и стали, выработанныя профессоромъ Sauveur и мною для международной ассоціаціи по испытанію матеріаловъ; описаны пудлинговая печь Roe, газовый генераторъ Mond'а (совершенно вкратцѣ) и доменный процессъ съ сухимъ дутьемъ по системѣ Gayley; переработана часть, касающаяся переходныхъ веществъ—мартенсита, тростита и сорбита. Но тутъ возникъ сложный вопросъ. Имѣя въ виду, что изъ общаго числа тѣхъ слушателей, для которыхъ главнымъ образомъ предназначается этотъ трудъ, каждые двадцать человѣкъ станутъ впослѣдствіи заниматься строительствомъ, горнымъ дѣломъ, машиностроеніемъ, инженернымъ дѣломъ или химіей и, вѣроятно, только одинъ станетъ металлургомъ-практикомъ, слѣдовало ли далѣе усложнять этотъ и безъ того сложный предметъ, настаивая на роли до сего времени гипотетическаго бэта-желѣза, или же слѣдовало упростить его, затронувъ, такъ сказать, только поверхностно эту аллотропическую форму и относясь къ этимъ переходнымъ веществамъ,

какъ къ чисто механическимъ смѣсямъ, состоящимъ изъ трехъ первичныхъ веществъ — аустенита, цементита и феррита, въ различныхъ пропорціяхъ и въ различныхъ стадіяхъ аггрегаціи? Я выбралъ послѣдній путь—хотя и не безъ серьезныхъ опасеній.

Н. М. Н.

Columbia University
in the City of New-York.
12 февраля 1906.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

Введеніе.

1) Вступленіе. Къ изученію строенія сплавовъ побуждаютъ насъ, помимо общаго интереса, представляемаго этимъ вопросомъ, еще причины чисто спеціальнаго характера. Дѣло въ томъ, что пониманіе этого предмета обѣщаетъ имѣть огромное практическое значеніе при изученіи какой-либо серіи сплавовъ, напримѣръ, въ томъ случаѣ, когда предстоитъ задача опредѣлить, какіе сплавы являются самыми цѣнными по свойствамъ въ серіи сплавовъ двухъ данныхъ металловъ. Это напоминаетъ собою высшую математику. Имѣя передъ собою уравненіе данной кривой, мы въ состояніи обнаружить, при помощи высшей математики, положеніе всѣхъ особенныхъ точекъ этой кривой, при чемъ нѣтъ необходимости вычерчивать всю ее цѣликомъ. До извѣстной степени дѣло обстоитъ подобнымъ же образомъ и при изученіи строенія серіи сплавовъ, хотя бы висмута съ оловомъ или сурьмы съ мѣдью. Можно ожидать, что строеніе такого рода серіи сплавовъ будетъ измѣняться равномѣрно отъ одного конца серіи до другого. Но при ближайшемъ изслѣдованіи такой серіи, можно натолкнуться на особыя точки, при которыхъ равномѣрность измѣненія строенія рѣзко нарушается.

Такія точки могутъ быть названы критическими точками строенія.

И совершенно подобно тому, какъ математика указываетъ намъ на особенныя точки кривой, для которой извѣстно урав-

неніе, точно такъ же случается, что эти критическія точки строенія могутъ быть обнаружены при помощи немногихъ легкихъ опытовъ.

Это очень важно потому, что можно ожидать, что критическія точки строенія будутъ также и критическими точками полезныхъ свойствъ. Изслѣдуя тягучесть, мы можемъ ожидать критической точки для тягучести въ той части серіи, гдѣ находится критическая точка строенія: тамъ мы можемъ ожидать максимума или минимума тягучести. То же самое относится и до многихъ другихъ полезныхъ свойствъ.

Поэтому-то методы, которые обѣщаютъ намъ съ относительной легкостью указать вѣроятное строеніе серіи сплавовъ двухъ данныхъ металловъ и положеніе ихъ критическихъ точекъ, тѣмъ самымъ обѣщаютъ указать намъ и тѣ сплавы въ серіи, которые будутъ рѣзко выдѣляться по своимъ желательнымъ или нежелательнымъ свойствамъ. Короче сказать, знаніе строенія серіи сплавовъ даетъ намъ методъ высшаго анализа, когда поставлена задача найти въ этой серіи наиболѣе цѣнные по свойствамъ сплавы. Конечно, этими указаніями не исчерпывается еще все значеніе изученія вопроса о строеніи сплавовъ. Они только отграничиваютъ ту область, которая обѣщаетъ быть самой плодотворной.

2) **Возможныя составляющія сплавовъ.** Неорганическія вещества могутъ быть подраздѣлены на три главныхъ класса:

1) простыя тѣла,

2) опредѣленныя химическія соединенія элементовъ между собой и

3) растворы.

Точно также въ сплавахъ мы различаемъ три класса составляющихъ:

1) чистые металлы;

2) опредѣленныя химическія соединенія этихъ металловъ между собой, какъ $AuAl_2$, антимонидъ мѣди (Cu_8Sb_3?) и антимонидъ олова ($SnSb$), а также, въ меньшемъ количествѣ, опредѣленныя химическія соединенія металловъ съ нѣкоторыми металлоидами, какъ углеродъ и сѣра, входящими въ составъ нѣкоторыхъ сплавовъ. Однимъ изъ самыхъ важныхъ въ послѣднемъ классѣ соединеній является карбидъ желѣза, Fe_3C, находимый въ стали и обыкновенно называемый цементитомъ;

3) то, что называется теперь твердымъ растворомъ одного металла въ другомъ. Значеніе этого термина будетъ объяснено въ § 5. Пока для насъ достаточно указать, что въ сплавахъ мы имѣемъ эти три класса составляющихъ, соотвѣтствующихъ тремъ большимъ классамъ, на которые могутъ быть въ общихъ чертахъ подѣлены неорганическія вещества.

Въ каждой данной части какого-либо сплава могутъ одновременно содержаться представители всѣхъ трехъ классовъ.



Рис. 1. Перлитъ и ферритъ.

Многоугольники состоятъ изъ перлита, сѣтка—изъ феррита.

(Sorby, «Journ. Iron and Steel Inst.», 1887, I, стр. 255 и слѣд., рис. 13).

Въ этомъ отношеніи, какъ и въ многихъ другихъ, сплавы напоминаютъ кристаллическія горныя породы, на которыя они похожи по общимъ условіямъ образованія. Кристаллическія горныя породы произошли, подобно нашимъ сплавамъ, путемъ охлажденія изъ расплавленнаго состоянія, или, по меньшей мѣрѣ, ихъ первоначальная температура была настолько высока, что атомы, составляющіе горную породу, могли свободно размѣщаться и образовывать опредѣленныя соединенія. Послѣднія же располагались, подчиняясь законамъ кристаллизаціи. Подъ ми-

кроскопомъ можно различить въ горныхъ породахъ три класса веществъ:

1) чистые металлы, какъ самородная мѣдь, золото и т. д.,

2) опредѣленныя химическія соединенія, какъ полевой шпатъ, слюда, кварцъ, роговая обманка, и

3) стекловидные обсидіаны, въ составъ которыхъ входятъ химическіе элементы не въ опредѣленномъ отношеніи, но въ произвольномъ (рис. 1).

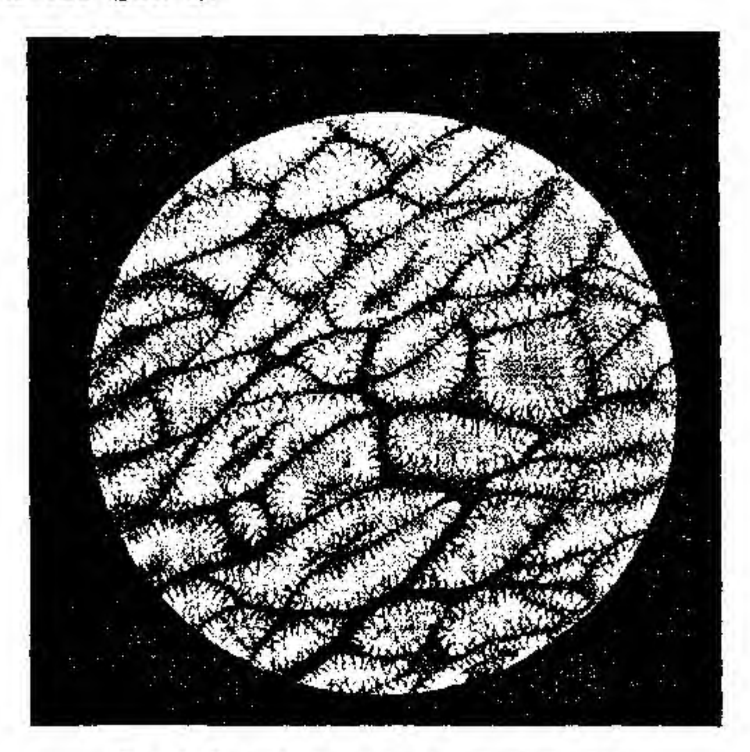


Рис. 2. Строеніе изверженной горной породы.
(Ріолитъ изъ Hot-Spring Hills, Pah-Ute Range).
«U. S. Geological Exploration of the Fortieth Parallel, VI, Microscopical Petrography», табл. VIII, рис. 1.

Совершенно подобно тому, какъ частички этихъ различныхъ веществъ, полевого шпата и другихъ минераловъ, представляются настолько незначительными по величинѣ, что могутъ быть обнаружены только подъ микроскопомъ, точно такъ же въ большинствѣ случаевъ и составляющія сплавовъ можно видѣть только подъ микроскопомъ. При этомъ часто приходится при-

бѣгать къ большимъ увеличеніямъ, достигающимъ иногда до тысячи разъ.

Рис. 1 даетъ понятіе объ обычномъ типѣ строенія сплавовъ, очень похожемъ на строеніе кристаллической горной породы, которое изображено на рис. 2.

Сходство сплавовъ съ кристаллическими горными породами этимъ не исчерпывается. Можно провести близкую аналогію между металлами съ одной стороны и кристаллическими горными породами съ другой, обусловливаемую происхожденіемъ ихъ путемъ постепеннаго охлажденія изъ расплавленныхъ или

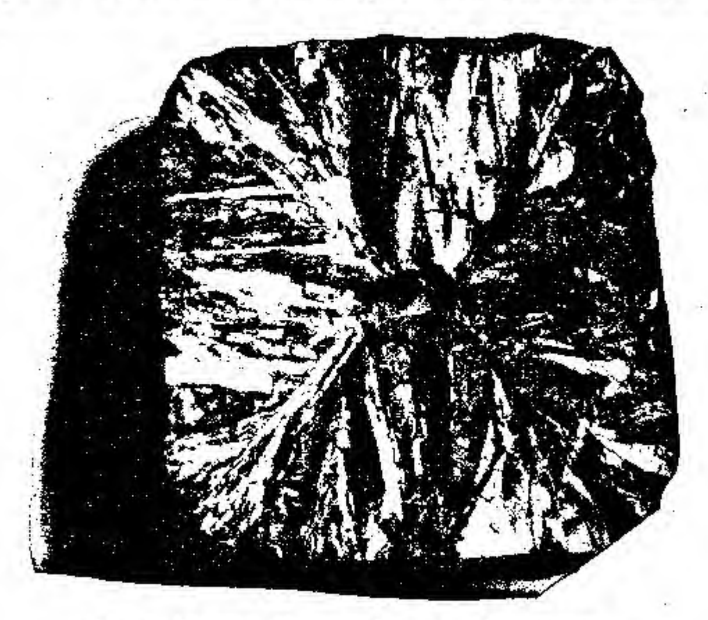


Рис. 3. Столбчатое строеніе стальной болванки.
Изъ коллекціи автора, натуральная величина.

полурасплавленныхъ массъ. Существуетъ также и аналогія между этими двумя классами твердыхъ тѣлъ и тѣми, которые, подобно льду, произошли путемъ постепеннаго затвердѣванія водныхъ растворовъ, а не расплавленныхъ массъ. Укажемъ на нѣкоторыя изъ этихъ сходныхъ чертъ.

3) Сходство металловъ съ горными породами. Во-первыхъ, столбчатое строеніе, когда горная порода образуетъ какъ бы огромныя колонны, мы можемъ наблюдать также у металловъ и у льда.

Столбы, образующіе такъ называемые «палисады» на Гудзонѣ, произошли путемъ медленнаго охлажденія составляющей ихъ горной породы. Они расположены вертикально, т. е. перпендикулярно къ поверхности охлажденія. Съ этой поверхности шла отдача тепла въ то время, когда расплавленная стекловидная масса, или обсидіанъ, переходила въ твердую породу.

У медленно охлажденныхъ металловъ мы наблюдаемъ то же столбчатое строеніе, при чемъ столбы равнымъ образомъ расположены перпендикулярно къ поверхности охлажденія, т. е. къ внѣшней поверхности, какъ это видно на рис. 3.

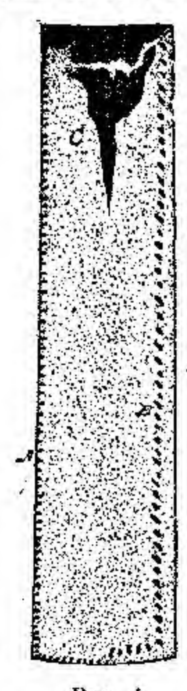


Рис. 4.

A—поверхностные пузыри.
B—глубоко расположенные пузыри.
C—усадочная раковина.

Подобное же столбчатое строеніе часто можно наблюдать и на большихъ кускахъ льда, въ особенности искусственнаго. Здѣсь столбики опять-таки располагаются перпендикулярно къ поверхности охлажденія. Затѣмъ мы находимъ въ застывшихъ болванкахъ стали въ верхней части по оси пустоту, образующуюся подъ вліяніемъ сжатія (рис. 4) и называемую усадочной раковиной. Обыкновенно подобную же грушевидную полость можно наблюдать и въ верхней части кусковъ искусственнаго льда.

Превосходные образчики минераловъ, украшающіе наши минералогическіе кабинеты, образуются обыкновенно въ полостяхъ горныхъ породъ. Превосходные кристаллы желѣза, равнымъ образомъ, по временамъ находятъ въ пустотахъ стальныхъ болванокъ (рис. 5).

Подобнымъ же образомъ и въ грушевидной полости кусковъ искусственнаго льда часто находятъ прекрасные мелкіе кристаллы льда.

Совершенно такъ же, какъ изгибъ горныхъ породъ, образующихъ земную кору, вызываетъ слоистое строеніе, и въ массахъ желѣза, подвергнувшихся изгибу, замѣчается то же строеніе (рис. 6).

Наконецъ, газы, освобождающіеся при застываніи, являются причиной образованія пузырей какъ въ болванкахъ стали, такъ и льда и стекла (*A* и *B*, рис. 4).

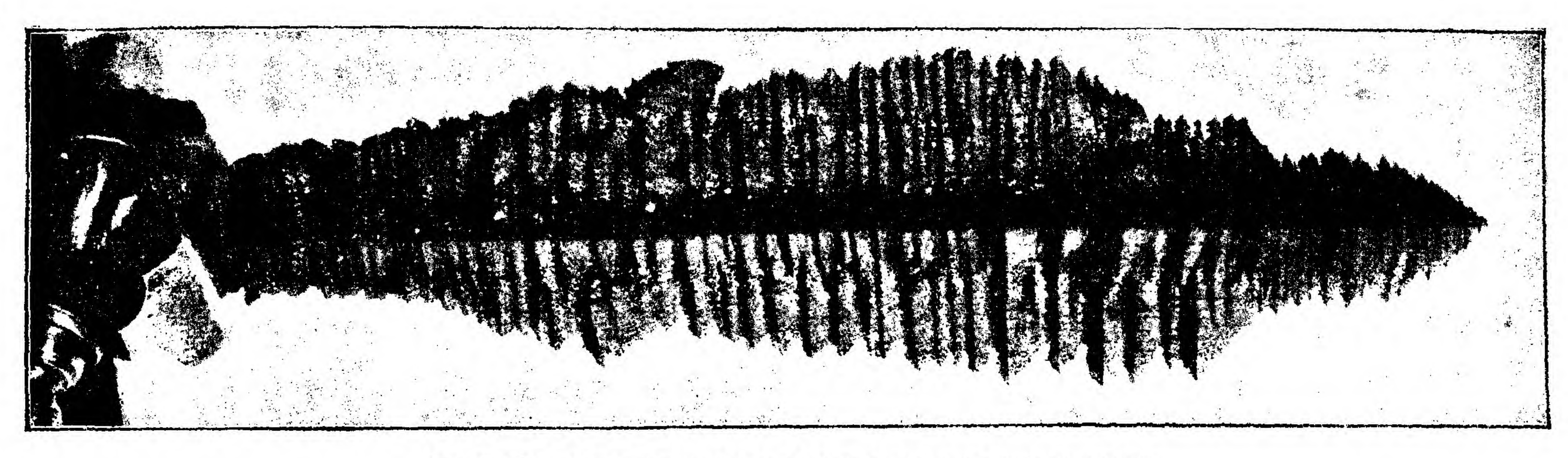
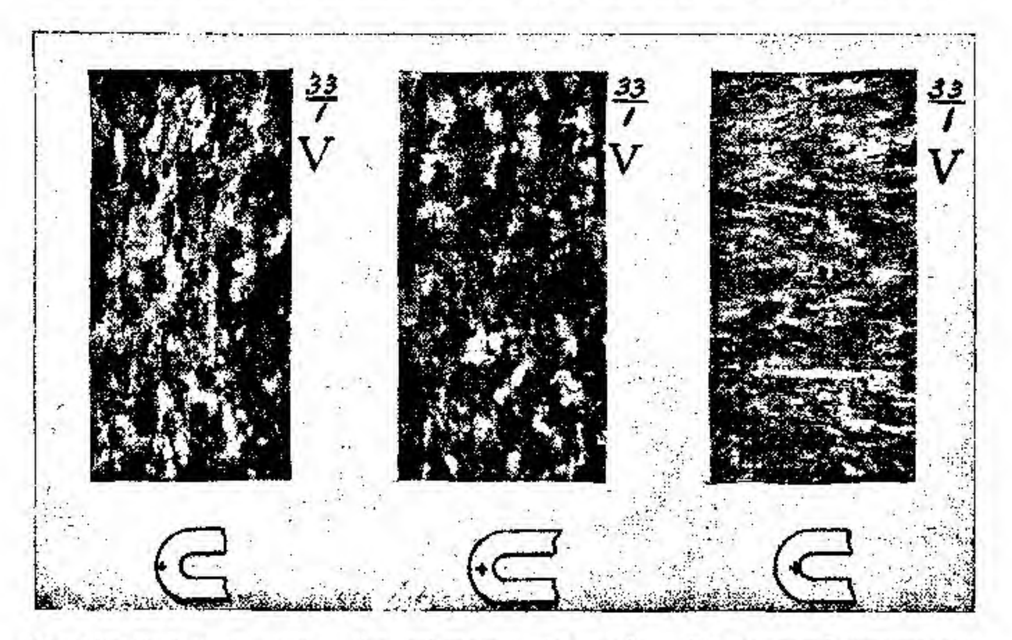


Рис. 5. Кристаллъ стали, около половины натуральной величины.

Изъ коллекціи профессора Д. К. Чернова («The Metallographist», II, стр. 74).

Эти пустоты возникаютъ въ то время, когда масса еще достаточно подвижна, чтобы дать выдѣляющимся частичкамъ газа собраться въ пузыри, но уже слишкомъ вязка для того, чтобы эти пузырьки могли подняться на поверхность и выдѣлиться наружу. Такимъ образомъ, эти пузырьки застреваютъ въ вязкой массѣ.

4) Химическія соединенія среди металловъ. Состояніе частичекъ чистыхъ металловъ, находимыхъ въ сплавахъ, не требуетъ пока особыхъ объясненій, относительно же химическихъ соединеній и твердыхъ растворовъ надо сказать нѣсколько словъ.



Изъ внѣшней стороны сгиба. *Многоугольники (кристаллы) феррита удлинены, параллельно внѣшней сторонѣ.*

Изъ нейтральной части сгиба. *Многоугольники феррита мало измѣнили форму, но пересѣкаются линіями сдвига.*

Изъ внутренней стороны сгиба. *Многоугольники феррита расположены перпендикулярно къ внѣшней сторонѣ сгиба.*

Рис. 6. Слоистость, вызванная въ низко-углеродистой стали изгибомъ.

Сталь, содержащая: углерода 0,035; марганца 0,025. Шлифы изготовлены J. A. Mathews, Ph. D., въ лабораторіи автора.

Химическія соединенія металловъ, въ общемъ, не слѣдуютъ закону валентности, и ихъ надо отнести къ разряду соединеній, извѣстныхъ подъ именемъ «молекулярныхъ». Законъ валентности сохраняетъ свое значеніе, но мы должны признать, что онъ не является общимъ закономъ. Мы можемъ, однако, сдѣлать очень важное обобщеніе, сказавъ, что слѣдованіе закону

валентности характерно для большого числа типичныхъ химическихъ соединеній, у которыхъ связь между атомами очень велика, и которые сильно отличаются по свойствамъ отъ своихъ составныхъ частей.

Въ полномъ согласіи съ этимъ общимъ положеніемъ находится и тотъ фактъ, что опредѣленныя соединенія металловъ между собой, какъ мѣди съ сурьмой, золота съ алюминіемъ или олова съ сурьмой, не слѣдующія закону валентности, являются непрочными. При этомъ свойства ихъ отличаются отъ входящихъ въ ихъ составъ металловъ гораздо меньше, чѣмъ это наблюдается у обычныхъ характерныхъ химическихъ соединеній, къ которымъ мы привыкли въ неорганической химіи. Свойства воды совершенно различны отъ свойствъ водорода и кислорода. Свойства поваренной соли не даютъ никакого указанія на свойства хлора или натрія. Конечно, мы не находимъ такого рѣзкаго различія между свойствами опредѣленнаго соединенія алюминія съ золотомъ съ одной стороны и свойствами золота и алюминія съ другой.

5) Твердые растворы. Что мы подразумѣваемъ подъ этимъ терминомъ? Мы примѣняемъ здѣсь слово растворы для отличія этихъ веществъ отъ опредѣленныхъ химическихъ соединеній. Мы подразумѣваемъ подъ твердыми растворами твердыя тѣла, которыя стоятъ въ такомъ же отношеніи къ твердымъ химическимъ соединеніямъ (соль), какъ жидкіе растворы (соленая вода) къ жидкимъ опредѣленнымъ химическимъ соединеніямъ (вода). При этомъ твердыя тѣла обладаютъ всѣми существенными свойствами растворовъ, поскольку ихъ твердость это допускаетъ.

Для ясности поставимъ себѣ вопросъ, каковы тѣ существенныя свойства, которыми отличаются обычные водные растворы отъ опредѣленныхъ химическихъ соединеній. Химическое соединеніе отличается двумя основными признаками: 1) Полнымъ превращеніемъ составныхъ частей въ совершенно отличное отъ нихъ вещество; такъ, хлоръ и натрій совершенно теряютъ свою индивидуальность и образуютъ особое вещество—поваренную соль. 2) Математически опредѣленнымъ отношеніемъ между составными частями. Въ случаѣ раствора опредѣленное отношеніе отсутствуетъ, но наблюдается тоже исчезновеніе составныхъ частей, какъ таковыхъ.

Въ растворѣ спирта съ водой мы не можемъ при помощи микроскопа или другихъ средствъ открыть спиртъ или воду. Они соединяются и даютъ новое вещество. Невозможно раздѣлить ихъ, ни пользуясь ихъ различнымъ удѣльнымъ вѣсомъ, ни при помощи центробѣжной силы. Болѣе легкій спиртъ не всплываетъ въ видѣ отдѣльнаго слоя на болѣе тяжелой водѣ. Такимъ образомъ, полное исчезновеніе составныхъ частей, какъ таковыхъ, и отсутствіе опредѣленнаго отношенія являются основными характерными признаками жидкихъ растворовъ.

Въ силу же того, что химическія силы, связывающія между собой растворенныя тѣла, сравнительно слабы, естественнымъ образомъ, и свойства раствора не особенно отличаются отъ средняго свойствъ двухъ тѣлъ, образующихъ растворъ.

Если мы обратимся къ твердому состоянію, то замѣтимъ, что въ стеклахъ дѣло обстоитъ подобнымъ же образомъ, съ той только разницей, что стекла представляютъ собою твердыя тѣла, обычные же растворы — жидкія. Кремнекислота, известь и щелочи въ стеклѣ совершенно утрачиваютъ свою индивидуальность. Ни подъ микроскопомъ ни при помощи другихъ какихъ либо средствъ мы не въ состояніи обнаружить ихъ въ стеклѣ въ отдѣльности,—до тѣхъ поръ, пока оно остается стекломъ. Только разрушивъ стекло, мы можемъ аналитическими методами доказать ихъ присутствіе. Въ стеклѣ, такимъ образомъ, мы имѣемъ исчезновеніе составныхъ частей. Въ то же время послѣднія находятся въ неопредѣленномъ отношеніи. Процентное содержаніе кремнекислоты или извести можетъ измѣняться въ безконечно малой градаціи отъ образца къ образцу, и это измѣненіе сопровождается соотвѣтствующимъ измѣненіемъ въ физическихъ свойствахъ. Измѣненіе въ свойствахъ и составѣ идетъ отъ образца къ образцу постепенно, тогда какъ измѣненіе при переходѣ отъ одного опредѣленнаго химическаго соединенія къ другому совершается скачкомъ, напримѣръ, при переходѣ отъ воды къ перекиси водорода. Стекла, такимъ образомъ, обнаруживаютъ оба основныхъ признака растворовъ: 1) исчезновеніе составныхъ частей, какъ таковыхъ, и 2) неопредѣленное отношеніе между составными частями.

Подобнымъ же путемъ многіе изъ металловъ какъ бы растворяются другъ въ другѣ и, отсутствуя въ твердомъ состояніи, какъ индивидуумы, образуютъ рядъ сплавовъ, члены котораго

могутъ отличаться по составу на безконечно малую величину. При этомъ составляющіе ихъ металлы не могутъ быть различены ни подъ микроскопомъ, ни при помощи иныхъ средствъ. Индивидуальное существованіе каждаго металла прекратилось. Здѣсь мы имѣемъ, слѣдовательно, тѣ же два характерныхъ признака растворовъ. На этомъ основаніи мы называемъ эти вещества «твердыми растворами». И точно такимъ же образомъ, какъ свойства жидкаго раствора, его цвѣтъ, плотность, электропроводность и т. д. рѣзко не отличаются отъ средняго свойствъ составляющихъ его частей, физическія свойства сплавовъ, представляющихъ изъ себя твердый растворъ, рѣзко не отличаются отъ свойствъ образующихъ ихъ металловъ [1]).

---

[1]) Авторъ нашелъ, что понятіе о «твердомъ растворѣ» многимъ дается очень трудно, и потому, рискуя показаться большинству читателей излишне пространнымъ, онъ всетаки считаетъ желательнымъ дать еще нѣсколько объясненій по этому предмету. Когда хлоръ и натрій соединяются, образуя хлористый натрій, они совершенно теряютъ свою индивидуальность. Возникаетъ совершенно новое вещество, имѣющее очень мало сходства съ каждой изъ составныхъ его частей.

Хлоръ и натрій послѣ соединенія образуютъ одно цѣлое. Они не могутъ быть раздѣлены механически или обнаружены инымъ путемъ до тѣхъ поръ, пока находятся въ соединеніи. Этого не достигнуть ни при помощи микроскопа, ни пользуясь разностью ихъ удѣльныхъ вѣсовъ или центробѣжной силой. Эту-то полную утрату своей индивидуальности и появленіе совершенно новаго вещества, въ которомъ невозможно обнаружить составныхъ его частей до тѣхъ поръ, пока оно остается неразложеннымъ, мы и называемъ исчезновеніемъ составныхъ частей.

Если мы размельчимъ кремнекислоту и окись желѣза въ мельчайшій порошокъ и смѣшаемъ какъ можно лучше, они все-таки останутся двумя отличными тѣлами—кремнекислотой и окисью желѣза, только тѣсно смѣшанными механически. Мы вновь можемъ раздѣлить ихъ соотвѣтственными механическими средствами. Подъ сильнымъ микроскопомъ мы можемъ увидѣть бѣлыя частички кремнекислоты и черныя—окиси желѣза. Если мы помѣстимъ эту смѣсь въ жидкость бòльшаго удѣльнаго вѣса, чѣмъ кремнекислота, но меньшаго, чѣмъ окись желѣза, мы можемъ раздѣлить ихъ въ силу ихъ различнаго удѣльнаго вѣса, такъ какъ кремнекислота всплыветъ, а окись желѣза осядетъ на дно. Можно раздѣлить ихъ и при помощи магнита.

Но сплавимъ ихъ, и они соединятся и исчезнутъ, они составятъ одно цѣлое; мы не въ состояніи уже будемъ ни различить ихъ другъ отъ друга какимъ бы то ни было способомъ, ни раздѣлить до тѣхъ поръ, пока они остаются связанными.

Предположимъ, что мы имѣемъ комнату, въ которой температура—40°Ц. Размельчимъ кристаллы льда и мѣднаго купороса, точно такъ же, какъ мы

6) Изоморфныя смѣси и смѣшанные кристаллы. Твердые растворы иногда называютъ также «изоморфными смѣсями» и «смѣшанными кристаллами». Названіе «изоморфныя смѣси» вызвано тѣмъ, что въ томъ случаѣ, когда два опредѣленныя не-

---

сдѣлали съ кремнекислотой и окисью желѣза. Для упрощенія положимъ, что при этой температурѣ ледъ и мѣдный купоросъ не дѣйствуютъ другъ на друга, и остаются совершенно индифферентны, какъ кремнекислота и окись желѣза. Смѣшаемъ ихъ насколько возможно совершеннѣе въ колбѣ. Они все-таки послѣ этого будутъ представлять изъ себя только очень тѣсную механическую смѣсь и не исчезнуть, какъ таковые. При достаточно сильномъ увеличеніи мы можемъ видѣть прозрачныя частицы льда и синія—мѣднаго купороса. Встряхиваніемъ колбы мы можемъ достичь перемѣщенія тяжелыхъ частичекъ мѣднаго купороса на дно, тогда какъ болѣе легкія частички льда останутся на верху. Нагрѣемъ однако содержимое колбы: ледъ растаетъ, а мѣдный купоросъ растворится въ образовавшейся водѣ.

Теперь уже мы не имѣемъ болѣе передъ собой механической смѣси. Произошло полное исчезновеніе составныхъ частей, которыхъ уже невозможно выдѣлить механическими способами или различить подъ микроскопомъ. Произошло то же самое, что съ хлоромъ и натріемъ при образованіи соли, или съ кремнекислотой и окисью желѣза при образованія силиката желѣза.

Конечно, при помощи подходящихъ химическихъ пріемовъ мы можемъ разложить этотъ растворъ: опустивъ въ него полоску желѣза, можно отложить на ней мѣдь. Можно разложить растворъ химически и инымъ путемъ. Но до тѣхъ поръ, пока растворъ остается растворомъ, вода и мѣдный купоросъ не образуютъ одно цѣлое, отличное отъ входящихъ въ составъ его частей. Мы можемъ придерживаться различныхъ взглядовъ на природу растворовъ. Можно принимать въ растворѣ существованіе іоновъ или чего угодно иного, но не подлежитъ сомнѣнію, что растворъ представляетъ собою одно цѣлое; въ растворѣ вода и мѣдный купоросъ потеряли свою индивидуальность и соединились, образовавъ какое-то новое вещество. Оставимъ совершенно въ сторонѣ различные взгляды на природу растворовъ и пока удовольствуемся тѣмъ положеніемъ, что 1) въ растворѣ прекращается отдѣльное существованіе его составныхъ частей и 2) что составныя части раствора находятся между собой въ неопредѣленномъ отношеніи.

Положимъ, мы нашли, что составныя части твердаго тѣла, напримѣръ кремнекислота, известь и щелочь въ стеклѣ, или золото и серебро въ сплавѣ золота съ серебромъ, совершенно утратили свое индивидуальное существованіе при образованіи стекла или вышеуказаннаго сплава. При этомъ мы находимъ также, что составъ твердаго тѣла не соотвѣтствуетъ опредѣленному отношенію, но измѣняется совершенно постепенно отъ образца къ образцу. Тогда мы въ правѣ сказать, что это твердое тѣло обладаетъ всѣми характерными чертами раствора, насколько эти характерныя черты совмѣстимы съ твердымъ состояніемъ.

Такое твердое тѣло мы и называемъ твердымъ растворомъ.

органическія соединенія кристаллизуются вмѣстѣ, образуя однородные кристаллы, при чемъ молекулы одного совершенно сливаются съ молекулами другого, эти соединенія являются изоморфными, т. е. каждое изъ нихъ порознь образовало бы кристаллы той же формы. Эта способность двухъ различныхъ веществъ терять свою индивидуальность, сливаясь въ одномъ кристаллѣ, всегда ассоціируется у насъ съ понятіемъ объ изоморфномъ тѣлѣ. Эта-то ассоціація и приводитъ къ тому, что слово «изоморфный» прилагается ко всѣмъ случаямъ такого полнаго слиянія. Но при нѣкоторомъ размышленіи видно, что сходство кристаллической формы, если бы оно было не только постоянно сопровождающимъ, но и необходимымъ условіемъ такого сліянія, не составляетъ еще его сущности. Нѣтъ никакой убѣдительной причины, почему бы не могло произойти полнаго сліянія двухъ металловъ, хотя бы кристаллизующихся въ различной формѣ. Ихъ соединеніе нельзя было бы назвать изоморфнымъ, но, конечно, его можно было бы назвать твердымъ растворомъ.

Главной же причиной, заставляющей предпочитать послѣдній терминъ, служитъ то, что онъ основанъ не только на постоянно сопровождающемъ или необходимомъ условіи, но на существенномъ свойствѣ этого класса веществъ, заключающемся въ томъ, что они обладаетъ всѣми основными свойствами водныхъ растворовъ, кромѣ текучести.

Что же касается до выраженія «смѣшанные кристаллы», то оно представляется крайне неудачнымъ, по той причинѣ, что можетъ легко ввести въ заблужденіе, какъ бы указывая на механическую смѣсь.

Напримѣръ, золото и серебро смѣшиваются во всѣхъ отношеніяхъ, и многіе называютъ образуемые ими кристаллы смѣшанными кристаллами золота и серебра. Многимъ можетъ показаться, что рѣчь идетъ о конгломератномъ строеніи, о механической смѣси частичекъ чистаго золота и чистаго серебра, что совершенно не соотвѣтствуетъ истинѣ. Говоримъ ли мы объ «изоморфныхъ» смѣсяхъ, или о «смѣшанныхъ» кристаллахъ, это только отвлекаетъ мысль отъ того, что дѣло идетъ о полномъ сліяніи составныхъ частей, тогда какъ съ понятіемъ «раствора» уже связано представленіе о сліяніи.

7) Твердые растворы могутъ быть неоднородны. Жидкіе растворы обыкновенно однородны, потому что въ жидкомъ состояніи диффузія идетъ съ значительной скоростью, такъ что даже если бы растворъ первоначально и не былъ однороднымъ, диффузія стремилась бы сдѣлать его однороднымъ. Принимая во вниманіе условія образованія твердыхъ растворовъ и медленность диффузіи въ твердомъ состояніи, намъ надо ожидать, что твердые растворы могутъ не быть однородными (См. § 55).

8) Методы изученія строенія сплавовъ. Петрографія достигла уже большого развитія въ то время, когда металлографія—наука о строеніи металловъ—находилась еще въ младенческомъ состояніи. Поневолѣ является вопросъ, почему методы, достигшіе такого развитія въ петрографіи, не нашли примѣненія къ изученію металловъ.

Можно сказать, что основной методъ петрографіи состоитъ въ распознаваніи мелкихъ кристаллическихъ зеренъ въ горныхъ породахъ при помощи микроскопа и полярископа и въ установленіи того, что эти зерна обладаютъ той же кристаллической формой и дѣйствуютъ такимъ же образомъ на поляризованный свѣтъ, какъ и большіе кристаллы тѣхъ же минераловъ. Опредѣливъ точно кристаллическую форму кварца и его дѣйствіе на поляризованный свѣтъ на большихъ кристаллахъ, мы въ состояніи узнать и самые мелкіе кристаллы кварца, установивъ, что послѣдніе обладаютъ той же кристаллической формой и тѣмъ же дѣйствіемъ на поляризованный свѣтъ. Ясно, что етотъ методъ совершенно неприложимъ къ металлографіи. Прежде всего очень мало металловъ и сплавовъ, которые можно было бы получить въ кристаллахъ, достаточно большихъ, чтобы они могли служить образцами, съ которыми возможно было бы сравнивать кристаллическую форму и другія свойства микроскопическихъ кристалловъ, находимыхъ въ сплавахъ.

Кромѣ того, металлы и ихъ сплавы непрозрачны, благодаря чему изученіе ихъ при помощи полярископа совершенно непримѣнимо. Открытіе X-лучей могло дать надежду, что они устранятъ затрудненія, вызываемыя непрозрачностью металловъ. Но эта надежда была совсѣмъ напрасна. Въ большинствѣ случаевъ частички различныхъ составляющихъ сплавовъ настолько малы, что каждый кристаллъ занялъ бы только незначительную часть толщины самаго тонкаго разрѣза; такимъ

образомъ, X-лучи, проходя черезъ разрѣзъ, прошли бы не черезъ опредѣленные кристаллы данной составляющей, но черезъ массу расположенныхъ одинъ подъ другимъ, кристалловъ различныхъ составляющихъ сплава. Вслѣдствіе этого форма каждаго изъ нихъ была бы совершенно затемнена другими, и дѣйствіе частички на X-лучи было бы замаскировано дѣйствіемъ другихъ кристалловъ, черезъ которые проходили бы тѣ же самые лучи. Конечно, есть случаи, когда кристаллы достаточно велики, чтобы ясно вырисовываться при примѣненіи X-лучей, но и въ этихъ случаяхъ строеніе можетъ быть лучше обнаружено при помощи микроскопа, послѣ должной подготовки поверхности.

Такимъ образомъ, методъ X-лучей не имѣетъ цѣны ни въ настоящемъ, ни въ будущемъ.

Въ настоящее время металлографическія изслѣдованія состоятъ въ сопоставленіи результатовъ, полученныхъ изученіемъ:

1) микроскопическаго строенія,

2) физическихъ свойствъ отдѣльныхъ сплавовъ и

3) физическихъ свойствъ серіи сплавовъ.

Относительно третьяго метода будетъ сказано ниже. Теперь же разсмотримъ эти методы послѣдовательно.

9) Микроскопическое изслѣдованіе[1]). Многіе изъ сплавовъ, какъ уже указывалось, имѣютъ порфировидное строеніе. Иначе говоря, подобно граниту, они состоятъ изъ отдѣльныхъ зеренъ, при чемъ каждое зерно представляетъ собою нѣчто отдѣльное, отдѣльный минералогическій видъ. Отдѣльныя зерна могутъ при-

---

[1]) A. Sauveur, «Microscopical Examination of Iron and Steel», «Engineering and Mining Journal», LXIV, стр. 215.

A. Sauveur, «Mechanical Uses of the Science of Metallurgy», «Engineering Magasine», XVII, стр. 977.

Stead, «Practical Metallography», «The Metallographist», III, стр. 220.

F. Osmond, «Méthode Général pour l'Analyse Micrographique des Aciers au Carbone», «Bulletin Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale», Май, 1895. См. предпочтительно перепечатку въ «Contribution à l'Etude des Alliages, Commission des Alliages» 1896—1900, стр. 277.

F. Osmond «La Metallographie Considerée comme Méthode d'Essai». Baumaterialienkunde. II, № 4.

Sir Wm. Roberts-Austen, «On Photomicrography of Steel Rails», Institution of Civil Engineers, 17 января 1899, Proceedings, CXXXVI, стр. 174.

Le Chatelier, «La Technique de la Métallographie Microscopique», «Contribution à l'Etude des Alliages, Commission des Alliages», 1896—1900, стр. 421.

надлежать къ двумъ или болѣе различнымъ видамъ. Въ случаѣ гранита присутствуютъ зерна трехъ различныхъ минералогическихъ видовъ: слюда, кварцъ и полевой шпатъ. Каждое отдѣльное зерно принадлежитъ къ одному изъ этихъ видовъ.

Составъ гранита, какъ цѣлаго, неопредѣлененъ въ томъ смыслѣ, что, взявъ рядъ различныхъ образцовъ гранита и опредѣливъ ихъ конечныя составляющія, мы найдемъ, что процентное содержаніе кремнекислоты или извести мѣняется произвольно отъ образца къ образцу. Но, хотя составъ гранита въ этомъ смыслѣ и совершенно неопредѣлененъ, и нѣтъ такого состава, относительно котораго можно было бы сказать: «Вотъ истинный составъ гранита», все же каждый изъ минераловъ, входящихъ въ составъ его, слюда, кварцъ и полевой шпатъ, представляетъ собою опредѣленное химическое соединеніе, съ опредѣленными физическими свойствами.

Подобнымъ же образомъ и многіе сплавы обладаютъ порфировиднымъ строеніемъ. Подъ микроскопомъ можно видѣть, что они состоятъ изъ зеренъ или кристалловъ различныхъ опредѣленныхъ веществъ. Каждое отдѣльное зерно состоитъ изъ одного изъ этихъ веществъ, при чемъ зерна расположены бокъ-о-бокъ, какъ слюда, кварцъ и полевой шпатъ въ гранитѣ. Въ составъ зеренъ порфировиднаго сплава могутъ входить: 1) чистые металлы[1]); 2) опредѣленныя химическія соединенія двухъ или болѣе металловъ въ строго опредѣленномъ соотношеніи, какъ, напримѣръ, золота съ алюминіемъ ($AuAl_2$), антимонидъ мѣди (Cu_3Sb_2?) или антимонидъ олова ($SnSb$); эти соединенія можно сравнить съ химическими соединеніями; 3) опредѣленныя химическія соединенія металловъ съ металлоидами, напримѣръ карбидъ желѣза, Fe_3C, называемый цементитомъ, который играетъ очень значительную роль въ металлографіи стали и желѣза.

Микроскопическое изслѣдованіе имѣетъ цѣлью установить, является ли строеніе даннаго сплава порфировиднымъ, иначе говоря, состоящимъ изъ отдѣльныхъ зеренъ опредѣленнаго химическаго состава, или стекловиднымъ, представляющимъ со-

---

[1]) Ради простоты, условно мы пользуемся выраженіемъ чистые металлы. Очень вѣроятно, что въ порфировидныхъ сплавахъ частички, кажущіяся на первый взглядъ чистыми металлами, на самомъ дѣлѣ не совсѣмъ чисты. Въ каждомъ, кажущемся чистомъ, металлѣ растворены хотя и въ очень небольшомъ количествѣ, остальные металлы, входящіе въ составъ сплава.

бою твердый растворъ. Возможно кромѣ того и одновременное существованіе кристалловъ опредѣленнаго состава и твердаго раствора. Дальнѣйшая задача состоитъ въ опредѣленіи формы, величины, а также физическихъ и химическихъ свойствъ этихъ различныхъ составляющихъ. Прежде всего металлическая масса полируется, для того, чтобы имѣть при разсматриваніи подъ большимъ увеличеніемъ значительное пространство. Затѣмъ полированная поверхность подвергается физическому или химическому воздѣйствію, и въ силу того, что различныя составляющія относятся къ нему различнымъ образомъ, это даетъ не только возможность ихъ отличать одну отъ другой, но и опредѣлить ихъ форму, внѣшній видъ и свойства. Изъ примѣняемыхъ для этой цѣли методовъ пять заслуживаютъ упоминанія. Изъ нихъ первые три химическіе, четвертый механическій и пятый частью химическій, частью механическій.

a) Простая обработка какимъ либо растворителемъ, напримѣръ азотной кислотой, растворомъ іода и т. п. Этимъ методомъ мы обязаны Sorby[1]). При этомъ одна изъ составляющихъ можетъ растворяться болѣе другой или окраситься иначе, чѣмъ другая. Можетъ также произойти разъѣданіе въ мѣстахъ соприкосновенія кристалловъ. Какъ бы то ни было, при этомъ должна обнаружиться форма кристалловъ при разсматриваніи шлифа подъ микроскопомъ.

b) Методъ Weyl'я, хорошо разработанный Charpy, состоитъ въ обработкѣ растворителемъ подъ вліяніемъ очень слабаго электрическаго тока. Charpy беретъ въ качествѣ электродовъ съ одной стороны изслѣдуемый сплавъ, съ другой платину или другой сплавъ, настолько близкій по составу къ изслѣдуемому, что возникаетъ очень слабая электродвижущая сила, и разъѣданіе идетъ очень слабо. Вообще, примѣненіе всѣхъ этихъ методовъ требуетъ крайней осторожности. Частички, которыя мы желаемъ обнаружить и идентифицировать, настолько малы и часто такъ слабо закрѣплены, что требуется величайшая осторожность, будь то при растворенiи или физической обработкѣ, чтобы не удалить ихъ механически.

c) Окраска посредствомъ нагрѣванія. Различныя составляющія сплава могутъ получить различную окраску при осторож-

---

1) «Journal Iron and Steel Institute», 1887, I, стр. 255.

номъ нагрѣваніи полированной поверхности. Окраска эта вызывается образованіемъ тонкаго слоя окисловъ на легче окисляющихся частяхъ. Этотъ способъ примѣнялся Guillemin'омъ и послѣ него Stead'омъ, при чемъ привелъ къ очень хорошимъ результатамъ [1]).

d) Рельефная полировка. Изъ механическихъ методовъ очень важенъ методъ «рельефной полировки» Osmond'a, основанный на томъ, что при продолжительной, очень осторожной полировкѣ стираются болѣе мягкія составляющія сплава, обладающаго порфировиднымъ строеніемъ, тогда какъ болѣе твердыя остаются и рельефно выдѣляются [2]).

e) Другой методъ Osmond'a представляетъ собою очень удачную комбинацію химической и механической обработки. При полировкѣ примѣняется реактивъ, разъѣдающій или красящій различныя составляющія различнымъ образомъ. Такимъ образомъ, разрушеніе химическимъ путемъ и стираніе идутъ одновременно.

---

[1]) «Journal Iron and Steel Institute» 1900, II, стр. 137

[2]) F. Osmond, «Méthode Générale pour l'Analyse Micrographique des Aciers au Carbone». «Bulletin de la Société d'Encouragement», Май, 1895. Слѣдуетъ предпочесть перепечатку въ «Contribution à l'Etude des Alliages» 1896—1900, стр. 277.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

Кривыя охлажденія.

10) Физическія свойства отдѣльныхъ сплавовъ. Кривыя охлажденія. При изученіи ряда сплавовъ двухъ металловъ, напримѣръ, сплавовъ серебра съ золотомъ или свинца съ оловомъ, конечно, намъ пришлось бы изслѣдовать много отдѣльныхъ сплавовъ, если бы мы пожелали убѣдиться въ томъ, въ какой степени каждый изъ нихъ обладаетъ извѣстнымъ, особенно насъ интересующимъ свойствомъ, будь то твердость, сопротивленіе разрыву, электропроводность или какое-либо иное свойство. Но кромѣ этого, чтобы установить строеніе каждаго отдѣльнаго сплава, необходимо опредѣлить съ большой тщательностью его «кривую охлажденія». Поясним на примѣрѣ, что̀ подразумѣвается подъ кривой охлажденія.

Опустимъ термометръ въ сосудъ съ водой, помѣстимъ послѣдній въ охладительную смѣсь и будемъ слѣдить за паденіемъ температуры, откладывая при этомъ температуру на оси ординатъ, а время на оси абсциссъ.

При этомъ получится кривая, подобная изображенной на рис. 7. По мѣрѣ того, какъ температура воды, постепенно понижаясь, будетъ приближаться къ температурѣ охладительной смѣси, паденіе ея будетъ происходить все медленнѣе, и кривая будетъ становиться болѣе пологой (AB), все время однако оставаясь ровной, т. е. безъ изгибовъ и критическихъ точекъ. Это будетъ продолжаться до тѣхъ поръ, пока температура не

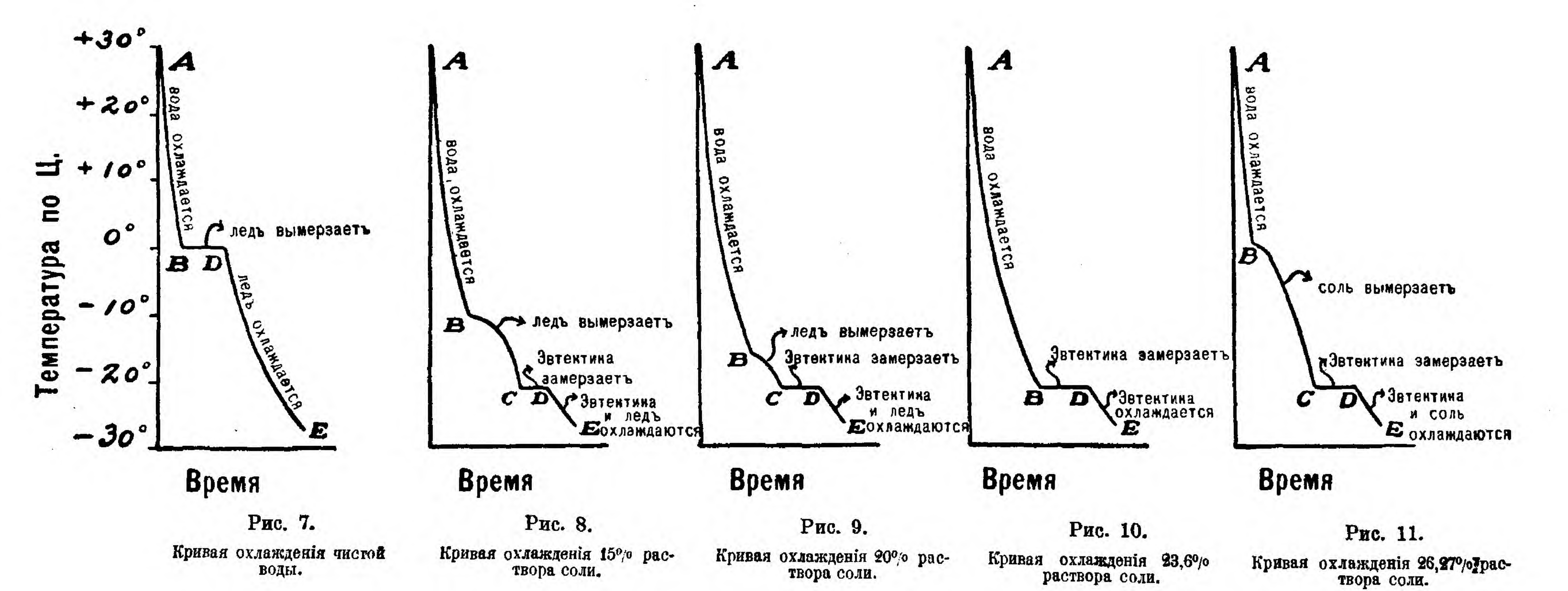


Рис. 7.
Кривая охлажденія чистой воды.

Рис. 8.
Кривая охлажденія 15% раствора соли.

Рис. 9.
Кривая охлажденія 20% раствора соли.

Рис. 10.
Кривая охлажденія 23,6% раствора соли.

Рис. 11.
Кривая охлажденія 26,27% раствора соли.

понизится до 0° Ц. При этой точкѣ вода начнетъ замерзать, и температура будетъ оставаться постоянной до тѣхъ поръ, пока не замерзнетъ вся вода. Кривая при этомъ будетъ идти горизонтально (*BD*). Какъ только замерзнетъ вся вода, температура образовавшагося льда будетъ вновь понижаться, стремясь сравняться съ температурой охладительной смѣси, и это выразится на кривой участкомъ *DE*.

Причиной такой остановки въ паденіи температуры служитъ то обстоятельство, что замерзаніе значительной массы воды требуетъ продолжительнаго времени. Пока же вся масса не замерзнетъ, не замерзшая вода будетъ находиться при температурѣ замерзанія, т. е. при постоянной температурѣ. Иначе можно объяснить это явленіе и такимъ образомъ, что при переходѣ изъ жидкаго въ твердое состояніе освобождается тепло, которое и останавливаетъ паденіе температуры.

На участкахъ кривой *AB* и *DE* не происходитъ химическаго или физическаго измѣненія воды и льда, что и обусловливаетъ непрерывность этихъ частей кривой.

11) Маточная жидкость и маточный металлъ. Во всякій данный моментъ во время замерзанія жидкой или расплавленной массы та часть ея, которая остается еще жидкой или расплавленной, т. е. еще не замерзшая часть, называется «маточной жидкостью» у водныхъ растворовъ и «маточнымъ металломъ» у расплавленныхъ металловъ.

12) Другіе изгибы на кривыхъ охлажденія. Точно такъ же, какъ тепло, развивающееся при замерзаніи воды, останавливаетъ паденіе температуры, и каждое химическое или физическое измѣненіе, происходящее въ охлаждающейся массѣ (будь то водный растворъ, сплавъ или горная порода), сопровождается обыкновенно выдѣленіемъ или поглощеніемъ тепла, короче говоря, какимъ-либо тепловымъ эффектомъ. Послѣдній же долженъ сказаться на ходѣ охлажденія и измѣнить направленіе кривой. Напримѣръ, идеальная кривая охлажденія чистаго металла должна быть такого же типа, какъ изображенная на рис. 7, потому что при охлажденіи идеальнаго металла въ немъ не должно происходить иного измѣненія, кромѣ замерзанія. Если, однако, металлъ при охлажденіи претерпѣваетъ измѣненіе, это измѣненіе должно отозваться на видѣ кривой.

Прекрасный примѣръ такихъ измѣненій даетъ кривая охлажденія чистаго желѣза. Она обнаруживаетъ, какъ видно на рис. 12, не менѣе десяти изгибовъ. Не всегда легко объяснить такіе изгибы. Помимо участка, соотвѣтствующаго переходу желѣза изъ жидкаго въ твердое состояніе, два изгиба кривой при 895° Ц. и при 766° Ц., повидимому, соотвѣтствуютъ аллотропическимъ измѣненіямъ желѣза въ твердомъ состояніи. Эти точки принято обозначать Ar_3 и Ar_2. Послѣдняя изъ нихъ совпадаетъ съ появленіемъ магнитныхъ свойствъ, т. е. при температурахъ выше Ar_2, желѣзо не обладаетъ магнитными свойствами, ниже же Ar_2 оно вновь ихъ обнаруживаетъ (см. §§ 162, 193) (рис. 12).

13) Искаженіе кривыхъ охлажденія. Кривыя охлажденія, изображенныя на рис. 7—11, только схемы. Для того, чтобы показать съ большей ясностью ихъ характерныя черты, изгибы представлены преувеличенными, и нѣкоторыя отступленія отъ нормальнаго хода оставлены безъ вниманія. Упомянемъ для поясненія о двухъ причинахъ такого рода отступленій.

14) Переохлажденіе. Часто наблюдается, что замерзаніе жидкаго или расплавленнаго тѣла вмѣсто того, чтобы начинаться точно при истинной точкѣ замерзанія даннаго вещества, замедляется вслѣдствіе извѣстнаго рода инерціи молекулъ и наступаетъ только тогда, когда температура опустится значительно ниже этой точки. Это явленіе называется переохлажденіемъ. Но какъ только начинается замерзаніе, выдѣленіе теплоты повышаетъ температуру, чаще всего вплоть до точки замерзанія. При этомъ уже температура остается постоянной до конца замерзанія (См. § 30).

15) Ошибки въ наблюденіяхъ. Предполагается, что приведенныя здѣсь кривыя представляютъ охлажденіе маточной массы, т. е. части, которая во время замерзанія остается жидкой и замерзаетъ послѣдней. Въ случаѣ воднаго раствора это—маточный растворъ, въ случаѣ сплава—маточный металлъ. Но хотя и предполагается, что кривыя указываютъ на температуру маточной массы, однако къ концу замерзанія дѣло обстоитъ нѣсколько иначе, потому что тогда точное опредѣленіе температуры маточной массы не представляется возможнымъ. Очевидно, что къ концу замерзанія, когда количество маточной массы становится очень незначительнымъ, только часть шарика термометра, или иного прибора той же величины, можетъ находиться въ маточной массѣ.

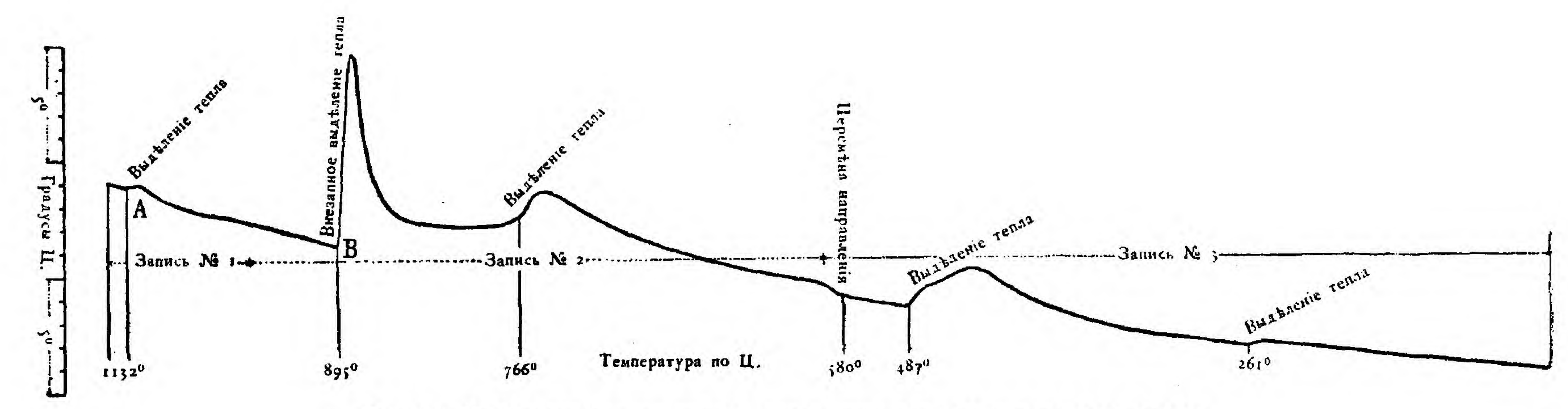


Рис. 12. Дифференціальная кривая охлажденія электролитическаго желѣза.

(Roberts-Austen, «Fifth Report Alloys Research Commitee», таблица 2, 1899, также «The Metallographist», II, стр. 194).

Абсциссы выражаютъ дѣйствительныя температуры, ординаты же разницы, для каждой температуры, между температурой электролитическаго желѣза и температурой куска платины, охлаждающагося при одинаковыхъ внѣшнихъ условіяхъ. Этотъ чувствительный методъ обнаруживаетъ даже очень слабыя выдѣленія и поглощенія тепла.

Конечно, термо-электрическія измѣренія допускаютъ гораздо большую точность. При этомъ методѣ опредѣляютъ температуру маточной массы, помѣщая въ нее термо-пару, которая состоитъ изъ спаянныхъ или просто скрученныхъ концовъ двухъ проволокъ неодинаковыхъ металловъ. Проволоки эти дѣлаются требуемой длины, и противоположные концы ихъ также скручиваются и держатся при постоянной температурѣ, положимъ, комнатной. Вслѣдствіе разности температуръ между термо-парой т. е. спаемъ, помѣщеннымъ въ маточную массу, и холоднымъ спаемъ, т. е. внѣшнимъ, находящимся при комнатной температурѣ, въ проволокахъ возникаетъ электрическій токъ, зависящій отъ разности температуръ. Измѣряя этотъ токъ чувствительнымъ гальванометромъ, мы можемъ опредѣлить разность температуръ между спаемъ въ маточной массѣ и внѣшнимъ спаемъ. Зная же температуру послѣдняго, мы можемъ опредѣлить и температуру термо-пары. Термо-пара можетъ быть сдѣлана изъ очень тонкихъ проволокъ, такъ какъ сила тока зависитъ только отъ разности температуръ между термо-парой и холоднымъ спаемъ. По этой причинѣ указанія даннаго прибора, очевидно, могутъ относиться къ очень незначительной части изслѣдуемой маточной массы, а не ко всей въ цѣломъ. Показанія же ртутнаго термометра должны по необходимости относиться къ сравнительно гораздо большей части, по крайней мѣрѣ равной объему его шарику.

Существуютъ однако причины, ведущія къ ошибкамъ при наблюденіяхъ даже при помощи этого тонкаго метода.

Во-первыхъ, этотъ методъ даетъ правильныя указанія относительно температуры маточной массы только до тѣхъ поръ, пока она присутствуетъ въ значительномъ количествѣ. Къ самому же концу замерзанія, когда маточная масса будетъ представлять собою маленькую каплю, температура термо-пары будетъ ниже температуры маточной массы. Объясняется это тѣмъ, что температура уже замерзшей массы ниже температуры маточной массы, при чемъ эта разница температуръ, не особенно замѣтная въ мѣстѣ соприкосновенія съ маточной массой, дѣлается значительной во внѣшнихъ слояхъ, сильно отдающихъ тепло наружу, въ среднихъ же слояхъ она имѣетъ промежуточное значеніе. При томъ разница температуръ тѣмъ значительнѣе, чѣмъ меньше теплопроводность металла. Въ силу этого проволоки, идущія отъ

термо-электрическаго спая, передаютъ тепло къ внѣшнему холодному слою и способствуютъ пониженію температуры спая ниже температуры окружающей его маточной массы. Это явленіе обнаруживается тѣмъ рѣзче, чѣмъ меньше количество остающейся маточной массы.

Во-вторыхъ, принимая во вниманіе, что замерзаніе слоевъ не идетъ математически концентрично, мы не можемъ ожидать, чтобы послѣднія частички замерзающей маточной массы непремѣнно помѣщались въ центрѣ. Гораздо болѣе вѣроятія, что онѣ будутъ помѣщаться болѣе или менѣе эксцентрично, и, такимъ образомъ, термо-пара къ концу замерзанія можетъ и не находиться въ маточной массѣ. Вѣрнѣе всего, что пара будетъ заключена въ слоѣ, застывшемъ ранѣе послѣднихъ частицъ маточной массы, а слѣдовательно и болѣе холодномъ, чѣмъ послѣдняя. Работая съ большими количествами и ведя охлажденія чрезвычайно медленно, можно уменьшить ошибки, проистекающія отъ этихъ причинъ, но избѣжать ихъ вполнѣ едва ли возможно.

Приведемъ примѣръ такого искаженія кривыхъ.

Внѣшній уголъ *D* теоретически долженъ быть острымъ въ случаѣ чистаго вещества, какъ на рис. 7. На самомъ же дѣлѣ онъ получается болѣе или менѣе скругленнымъ, какъ на рис. 14, по всей вѣроятности, отчасти изъ-за того, что спай не находится къ концу замерзанія въ маточной массѣ. Другой вѣроятной причиной служитъ выдѣленіе растворенныхъ газовъ къ концу замерзанія. Даже при замерзаніи дистиллированной воды остающаяся еще незамерзшей вода, вообще говоря, не является чистой, но содержитъ въ растворѣ большее или меньшее количество атмосфернаго кислорода и азота. Выдѣленіе этихъ газовъ сопровождается поглощеніемъ тепла и ведетъ къ искаженію кривой охлажденія.

16) Легкость термическихъ наблюденій. Кривая охлажденія даетъ намъ очень тонкій методъ наблюденія всѣхъ измѣненій, происходящихъ въ охлаждающейся массѣ, а также точнаго опредѣленія температуры, при которыхъ они наступаютъ. Помимо того, что методъ этотъ очень точенъ, онъ также крайне легокъ и скоръ, чѣмъ выгодно отличается отъ большинства обычныхъ методовъ изслѣдованія. Напримѣръ, требуется опредѣлить сопротивленіе сплава на разрывъ, его предѣлъ упругости и т. д. Для этого надо приготовить образцы довольно

значительной величины, совершенно свободные на всемъ протяженіи отъ какихъ бы то ни было механическихъ дефектовъ, въ родѣ раковинъ, трещинъ и т. п. Но и наблюденное сопротивленіе на разрывъ относится только къ мѣсту наименьшаго сопротивленія металла. Оно не дастъ прямого указанія на строеніе всей массы металла.

Точно также и измѣренія электропроводности, теплового расширенія и другихъ важныхъ свойствъ, требуя много труда и затратъ при приготовленіи образцовъ сплавовъ, даютъ очень мало указаній на ихъ строеніе. Напротивъ, методъ изученія кривыхъ охлажденія не только хорошо освѣщаетъ вопросъ относительно строенія сплавовъ, но представляетъ еще и то преимущество, что можетъ быть примѣненъ къ очень небольшимъ кускамъ. Къ тому же, если работа ведется съ самопишущимъ аппаратомъ, наблюденія можно производить чрезвычайно быстро, легко и въ то же время съ большой точностью.

17) Избирательное замерзаніе. Кривая охлажденія, представленная на рис. 8, отличается отъ кривой на рис. 7 тѣмъ, что она имѣетъ закругленный участокъ *BC* между участкомъ *AB* и горизонтальной частью *CD*. Эта кривая охлажденія является типичной для такихъ растворовъ, какъ, положимъ, 15-ти-процентный растворъ поваренной соли въ водѣ; скругленный участокъ *BC* отвѣчаетъ тому факту, что при замерзаніи растворъ соли образуетъ не только ледъ, какъ при замерзаніи чистой воды, но распадается на сравнительно чистые кристаллы льда и кристаллы соли.

Въ нѣкоторыхъ случаяхъ вымерзшая соль содержитъ кристаллизаціонную воду. Это явленіе далѣе не будетъ, однако, приниматься во вниманіе съ цѣлью упростить изложеніе.

18) Опредѣленіе понятія „избирательное замерзаніе“. Подъ избирательнымъ замерзаніемъ разумѣется то, что частички, вымерзающія изъ жидкой или расплавленной массы, во все время замерзанія не одинаковы по составу съ маточной массой. Замерзаніе идетъ такимъ образомъ, что изъ маточной массы извѣстные элементы или соединенія выдѣляются или въ чистомъ видѣ, или въ большей пропорціи, чѣмъ та, въ которой они въ ней находятся. Такъ, возвращаясь къ вышеуказанному случаю замерзанія раствора соли, мы видимъ, что прежде всего выпадаетъ почти чистый ледъ, т. е. съ гораздо меньшимъ содержа-

ніемъ соли, чѣмъ въ основномъ растворѣ. Это можетъ служить примѣромъ избирательнаго замерзанія.

Безъ сомнѣнія, многіе изъ насъ, читая описаніе путешествія Нансена, были удивлены тѣмъ обстоятельствомъ, что онъ не встрѣчалъ затрудненія въ полученіи чистой питьевой воды, хотя путь его лежалъ по льду, который, образовавшись изъ соленой воды, долженъ былъ бы содержать соль. Это отчасти объясняется тѣмъ, что онъ встрѣчалъ бассейны съ водой, образовавшейся изъ растаявшаго снѣга, но главнымъ образомъ тѣмъ обстоятельствомъ, что замерзаніе воды идетъ избирательнымъ путемъ. Образующійся первоначально ледъ почти не содержитъ соли, такъ какъ растворенная соль скопляется въ не замерзшей водѣ. Этимъ путемъ на поверхности соленой воды океана возникаетъ слой относительно чистаго льда. При таяніи верхнихъ слоевъ, подъ дѣйствіемъ лучей солнца, и повторномъ замерзаніи, часть соли вновь выпадаетъ, и ледъ становится еще чище. Путемъ повторной кристаллизаціи получается вода, годная для питья.

На прямыхъ опытахъ съ искусственной морской водой авторъ убѣдился, что послѣ двукратнаго вымораживанія получается годная для питья вода, хотя и солоноватая на вкусъ, но безъ непріятнаго привкуса. Внѣшній слой льда послѣ третьяго вымораживанія былъ совсѣмъ безвкусенъ, вода же, полученная при его таяніи, была пріятна на вкусъ и походила на минеральную воду Аполлинарисъ, безъ газа [1]).

[1]) Количественные результаты были слѣдующіе:

	Уд. вѣсъ.	Вкусъ.
1) Исходный растворъ, искусственная морская вода	1,0205	
2) 1-й ледъ, корка, образовавшаяся при частичномъ замерзаніи № 1.		
3) 1-й растворъ, полученный отъ полнаго таянія № 2.	1,0150	
4) 2-я ледяная корка, образовавшаяся при частичномъ замерзаніи № 3.		
5) 2-й растворъ, полученный отъ полнаго таянія № 4.	1,0060	Годный для питья, солоноватый, не оставляетъ по рту привкуса.
6) 3-я ледяная корка, образовавшаяся при частичномъ замерзаніи № 5.		
7) 3-й растворъ, полученный отъ полнаго таянія № 6.	1,0031	Пріятный на вкусъ, въ родѣ Аполлинариса, потерявшаго газъ.

19) Другія особенности кривыхъ охлажденія. Нѣсколько другихъ характерныхъ чертъ кривой на рис. 8 привлекаютъ къ себѣ вниманіе. Во-первыхъ, точка *B*, при которой начинается замерзаніе, лежитъ не при нормальной точкѣ замерзанія воды 0° Ц., а ниже, при —11° Ц. Растворенная соль, слѣдовательно, понижаетъ температуру замерзанія, при томъ въ извѣстныхъ предѣлахъ, чѣмъ больше соли содержится въ растворѣ, тѣмъ ниже лежитъ его точка замерзанія. Точно также при охлажденіи сплава свинца съ оловомъ (рис. 28*F*) застываніе олова начинается при гораздо низшей температурѣ, чѣмъ застываніе чистаго олова. Другими словами, хотя точка замерзанія чистаго свинца (326°) выше точки замерзанія чистаго олова (231°), послѣднее въ присутствіи свинца остается въ расплавленномъ состояніи ниже своей точки замерзанія (231°).

20) Замерзаніе захватываетъ значительный температурный интервалъ. Далѣе слѣдуетъ замѣтить, что замерзаніе 15-процентнаго раствора соли идетъ не при одной опредѣленной температурѣ, но захватываетъ значительный интервалъ, а именно отъ *B* до *C*. Это ясно изъ того, что было сказано въ § 18. Вода, вымерзая въ видѣ относительно чистаго льда, способствуетъ увеличенію концентраціи соли въ маточномъ растворѣ. Послѣдній же, вслѣдствіе обогащенія солью пріобрѣтаетъ все болѣе и болѣе низкую точку замерзанія. Иначе говоря, по мѣрѣ обогащенія маточнаго раствора солью, требуется все болѣе низкая температура для того, чтобы заставить выпадать относительно чистый ледъ. Это обстоятельство и обусловливаетъ значительный температурный интервалъ замерзанія. То же, что кривая закруглена, а не образуетъ прямой линіи, указываетъ, что пониженіе температуры замерзанія не строго пропорціонально времени, въ теченіе котораго оно совершается, но идетъ все съ большей скоростью, по мѣрѣ дальнѣйшаго хода замерзанія.

21) Естественность избирательнаго замерзанія. Принимая во вниманіе тотъ фактъ, что замерзаніе воднаго раствора соли является избирательнымъ, зададимся вопросомъ, можно ли было этого ожидать. Для этой цѣли попытаемся представить себѣ, что̀ происходитъ при замерзаніи 15-процентнаго раствора соли. Такая воображаемая картина, хотя бы она и не вполнѣ точно воспроизводила явленіе, можетъ принести большую пользу, такъ какъ при ея помощи легче объединить въ одно гармоничное

цѣлое рядъ фактовъ, вмѣсто того, чтобы смотрѣть на нихъ, какъ на нѣчто произвольное, подлежащее заучиванію и скорому забвенію.

Представимъ себѣ на время противное, т. е. что замерзаніе идетъ не избирательнымъ путемъ, и посмотримъ, насколько такого рода предположеніе естественно въ случаѣ 15-процентнаго раствора соли въ водѣ. При этомъ, для упрощенія, положимъ, что растворитель и растворенное тѣло не образуютъ химическаго соединенія. Съ другой стороны посмотримъ, не болѣе ли естественно избирательное замерзаніе.

Для того, чтобы имѣть точку опоры, предположимъ, что произошло замерзаніе очень небольшого количества раствора не избирательнымъ путемъ, при чемъ образовалась небольшая частичка соленаго льда, одинаковаго по составу съ маточнымъ растворомъ (85% льда и 15% соли). Для упрощенія примемъ, что твердый ледъ и твердая соль взаимно абсолютно нерастворимы (см. § 51). Вслѣдствіе взаимной нерастворимости должны выпасть совершенно различные кристаллы, чистаго льда съ одной стороны и чистой соли съ другой. Эти кристаллы находятся въ соприкосновеніи съ жидкимъ маточнымъ растворомъ.

Нетрудно убѣдиться въ томъ, что кристаллы соли должны раствориться. Во-первыхъ потому, что 15-процентный растворъ соли не можетъ оставаться жидкимъ при данной температурѣ (соотвѣтствующей его точкѣ замерзанія), тогда какъ растворъ, содержащій болѣе 15% соли, остается жидкимъ, вслѣдствіе того, что, какъ выше было только что указано, увеличеніе содержанія соли понижаетъ точку замерзанія. Поэтому, если бы кристаллы соли растворились, образовался бы маточный растворъ, способный оставаться жидкимъ при данной температурѣ. Общимъ же условіемъ, для растворимости даннаго вещества въ жидкости, съ которой оно находится въ соприкосновеніи, и служитъ образованіе раствора, не замерзающаго при данной температурѣ. Кристаллы соли должны растворяться въ маточномъ растворѣ, потому что этимъ путемъ онъ получаетъ возможность оставаться жидкимъ при данной температурѣ.

Кристаллы же льда не растворяются по той простой причинѣ, что ихъ растворение возстановило бы въ маточномъ растворѣ отношеніе воды къ соли, 85 : 15, и создало бы невозможность для него оставаться жидкимъ при данной температурѣ.

Такимъ образомъ, вымерзаетъ только чистый ледъ, соль же, относительно которой мы приняли, что она также выдѣляется, необходимо должна была бы раствориться. Замерзаніе, слѣдовательно, является строго избирательнымъ. Чтò было сказано относительно начальной стадіи замерзанія, должно быть вѣрно и для дальнѣйшаго процесса. Итакъ, избирательное замерзаніе не является неожиданнымъ. Если бы даже и вообразить себѣ, что произошло не избирательное замерзаніе, ясно, что оно тотчасъ должно было бы превратиться въ избирательное.

Особое вниманіе надо всегда обращать на вопросъ, будетъ ли раствореніе кристалла, относительно котораго принято, что онъ выпалъ при охлажденіи, способствовать тому, чтобы маточная масса оставалась жидкой при данной температурѣ, или нѣтъ. Съ этой точки зрѣнія получается очень простое объясненіе многихъ важныхъ и, на первый взглядъ, неожиданныхъ явленій.

22) Избирательное и неизбирательное замерзаніе. Какъ уже было указано, замерзаніе можетъ быть двухъ видовъ:

1) Избирательное, сопровождающееся увеличеніемъ концентраціи маточнаго раствора, примѣромъ котораго служитъ растворъ соли. На кривой охлажденія оно характеризуется наклоннымъ или закругленнымъ участкомъ, соотвѣтствующимъ замерзанію раствора. При этомъ вещество, выпадающее первымъ, неодинаково по составу съ массой, изъ которой оно вымерзаетъ, и въ силу этого въ незамерзшей маточной массѣ идетъ увеличеніе концентраціи одной изъ составляющихъ ее частей. Слѣдствіемъ же увеличенія концентраціи, является постепенное измѣненіе точки замерзанія маточной массы, обусловливающее то, что замерзаніе захватываетъ значительный температурный интервалъ.

2) Неизбирательное замерзаніе, при которомъ жидкая или расплавленная маточная масса замерзаетъ безъ измѣненія. По причинѣ того, что во все время замерзанія, составъ не замерзшей части не измѣняется, температура замерзанія остается постоянной. На кривой охлажденія это выражается горизонтальнымъ участкомъ, теоретически, съ острыми углами, подобно BD на рис. 7 (см. § 15). Оба вида замерзанія можно наблюдать какъ на сплавахъ, такъ и на водныхъ растворахъ.

При избирательномъ замерзанiи различаютъ два случая:

А) Когда получается однородное вещество, какъ при выпаденiи: 1) чистаго вполнѣ опредѣленнаго вещества (раньше уже для упрощенiя изложенiя это было принято относительно соли, вымерзающей изъ воднаго раствора соли); 2) чистаго металла, совершенно не содержащаго металловъ, съ которыми онъ былъ сплавленъ; 3) опредѣленнаго химическаго соединенiя двухъ или болѣе металловъ; 4) твердаго раствора, послѣдовательно отлагающiеся слои котораго одинаковы по составу, т. е. однороднаго твердаго раствора. Такой случай можно себѣ представить, но, какъ дальше будетъ указано, послѣдовательно отлагающiеся слои твердаго раствора обычно не одинаковы по составу. При застыванiи они не являются однородными, несмотря на стремленiе диффузiи уничтожить ихъ неоднородность (§§ 54, 55, 60 и 114).

В) Когда получается неоднородное вещество, какъ при выпаденiи неоднороднаго твердаго раствора.

23) Горизонтальный участокъ кривой и эвтектика. На кривой охлажденiя раствора соли (рис. 8) помимо закругленной части, которая была выше разсмотрѣна, есть еще горизонтальный участокъ *CD* съ острыми углами. Посмотримъ, каково его значенiе.

Какъ уже раньше было указано, по мѣрѣ охлажденiя раствора соли, идетъ выпаденiе льда, и остающiйся маточный растворъ все болѣе обогащается солью. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока температура не понизится до —22° Ц. и содержанiе соли въ маточномъ растворѣ не достигнетъ 23,6%, «эвтектической пропорцiи». Значенiе этого термина будетъ объяснено ниже. Увеличенiе концентрацiи дальше не идетъ, какъ мы увидимъ, по очень простой причинѣ. Дальнѣйшее вымерзанiе чистаго льда, а слѣдовательно и обогащенiе маточнаго раствора солью, прекращается и замерзанiе маточнаго раствора идетъ не избирательнымъ путемъ. Выдѣляющiйся ледъ имѣетъ тотъ же составъ, какъ и маточный растворъ, такъ что составъ обоихъ остается постояннымъ, чѣмъ въ свою очередь обусловливается постоянство точки замерзанiя маточнаго раствора. Это и выражается горизонтальнымъ участкомъ *CD* (см. § 10).

Но хотя замерзанiе маточнаго раствора, начиная съ этой точки, и становится неизбирательнымъ, такъ какъ то, что вы-

мерзаетъ, совершенно одинаково по составу съ маточнымъ растворомъ, все же идетъ оно совсѣмъ особеннымъ образомъ; а именно, маточный растворъ при замерзаніи распадается и образуетъ конгломератную массу, состоящую изъ отдѣльныхъ кристалловъ льда и отдѣльныхъ кристалловъ соли, расположенныхъ въ видѣ тонкихъ чередующихся пластинокъ. Какъ было уже указано, эта конгломератная масса въ цѣломъ совершенно одинакова по составу — пластинки соли образуютъ 23,6%, пластинки льда 76,4%. Процентное отношеніе пластинокъ замерзшей воды къ пластинкамъ соли въ эвтектической массѣ равно процентному отношенію воды къ растворенной соли въ маточномъ растворѣ, установившемуся къ тому времени, когда дальнѣйшее увеличеніе концентраціи прекратилось, и началось неизбирательное замерзаніе съ образованіемъ эвтектики.

24) Замерзаніе 20% раствора соли. Изслѣдуя замерзаніе не 15-процентнаго, а 20-процентнаго раствора соли, мы получили бы кривую точно такого же типа (рис. 9). Закругленная часть получилась бы при болѣе низкой температурѣ, вслѣдствіе того, что подъ вліяніемъ большого содержанія соли точка замерзанія лежитъ ниже, т. е. требуется большее пониженіе температуры для того, чтобы началось выдѣленіе льда. Закругленная часть кривой окончилась бы при той же температурѣ, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, потому что, независимо отъ начальной концентраціи соли, содержаніе ея въ маточномъ растворѣ должно достигнуть той же эвтектической пропорціи 23,6% при той же температурѣ, т. е. при —22°Ц. Но горизонтальная часть кривой будетъ длиннѣе въ случаѣ 20-процентнаго раствора соли, чѣмъ 15-процентнаго, потому что въ первомъ случаѣ количество остающагося маточнаго раствора, очевидно, будетъ больше, когда концентрація достигнетъ 23,6%, и замерзаніе его соотвѣтственно продлится болѣе долгое время.

Напротивъ, участокъ *BC* будетъ короче, потому что для достиженія эвтектической пропорціи изъ 20-процентнаго раствора должно вымерзнуть меньшее количество льда, чѣмъ изъ 15-процентнаго. Кромѣ того, замедленіе въ охлажденіи, вызываемое вымерзаніемъ льда, будетъ соотвѣтственно меньше, слѣдовательно и кривая между точками *B* и *C* будетъ болѣе пологой. Дѣйствительно, сравнивая участки *BC* на рис. 8 и рис. 9, можно видѣть, что первый гораздо болѣе изогнутъ, чѣмъ второй.

Короче говоря, если подраздѣлить замерзаніе на два періода— періодъ вымерзанія льда и періодъ замерзанія эвтектики, *BC* и *CD*, то ясно видно, что чѣмъ ближе содержаніе соли къ эвтектической пропорціи, тѣмъ ниже температура начала вымерзанія льда, и тѣмъ короче и менѣе изогнутъ участокъ *BC*. Въ то же время, тѣмъ длиннѣе будетъ участокъ *CD*, соотвѣтствующій замерзанію эвтектики.

25) Замерзаніе эвтектическаго раствора. Положимъ, что первоначальная концентрація соли въ растворѣ строго соотвѣтствуетъ эвтектической пропорціи 23,6%. При охлажденіи такого раствора вымерзанія льда совершенно бы не было, но при —22°С. весь растворъ замерзъ бы неизбирательнымъ путемъ, подобно чистому металлу или водѣ. При этомъ, какъ и въ предыдущихъ случаяхъ, произошло бы расщепленіе раствора, съ образованіемъ чередующихся пластинокъ льда и чистой соли.

26) Замерзаніе раствора болѣе концентрированнаго, чѣмъ соотвѣтствуетъ эвтектической пропорціи. Наконецъ, если растворъ первоначально содержитъ не 23,6% соли, а болѣе, положимъ 26%, то кривая охлажденія будетъ имѣть видъ изображенной на рис. 11, по типу одинаковой съ изображенными на рис. 8 и 9. Ея отличіе состоитъ въ томъ, что участокъ *BC* соотвѣтствуетъ не вымерзанію льда, а соли [1]), потому что первоначальный растворъ содержитъ свыше 23,6% соли, отвѣчающихъ эвтектической пропорціи.

Слѣдуетъ замѣтить, что замерзаніе и кристаллизація льда, а также выпаденіе или кристаллизація соли изъ раствора, который при охлажденіи становится пересыщеннымъ, представляютъ собою совершенно то же явленіе, какъ и застываніе металла. Это есть переходъ изъ жидкаго въ твердое состояніе.

Замерзаніе воды, въ свою очередь, не похоже на кристаллизацію соли; оба эти явленія происходятъ при такой низкой температурѣ, сравнительно съ которой обычно идетъ застываніе металловъ, что мы забываемъ о томъ, что это въ сущности одинаковыя явленія. Всякому, изучающему сплавы, чрезвычайно

---

[1]) Или гидрата, болѣе богатаго солью, чѣмъ эвтектика. Guthrie, Phil. Mag. 5 серія, I, 1876, стр. 355.

Въ этомъ случаѣ выпаденіе избытка соли совершенно одинаково съ выпаденіемъ соли изъ горячаго насыщеннаго раствора при охлажденіи.

важно имѣть въ виду полное сходство между явленіями застыванія металла, замерзанія воды и кристаллизаціи соли.

27) Эвтектика и кріогидратъ. Возвратимся къ воднымъ растворамъ соли. Прежде всего, долженъ имѣть важное значеніе тотъ фактъ, что, какова бы ни была первоначальная концентрація раствора, вымерзаніе эвтектики всегда начинается при одинаковой температурѣ, и маточный растворъ при этомъ имѣетъ опредѣленный составъ, отвѣчающій 23,6% соли. Это отношеніе воды къ соли называется «эвтектическимъ» или «кріогидратнымъ»и соотвѣтствуетъ отношенію, при которомъ наблюдается самая низкая точка плавленія, т. е. наибольшая легкоплавкость. Названіе «кріогидратъ» примѣняется обыкновенно къ воднымъ растворамъ, «эвтектика» же къ сплавамъ. Въ буквальномъ переводѣ «эвтектическій» значитъ «хорошо плавящійся». Guthrie согласно съ этимъ значеніемъ опредѣлилъ эвтектику, какъ наиболѣе легко плавящійся сплавъ. Но такъ какъ въ сущности кріогидратъ и эвтектика представляютъ собою одно и то же, то въ дальнѣйшемъ изложеніи мы и будемъ пользоваться только словомъ эвтектика.

28) Свойства эвтектики. Прежде всего укажемъ еще разъ на основныя свойства эвтектики:

1) Составъ ея и температура замерзанія постоянны и не зависятъ отъ первоначальнаго соотношенія между растворителемъ и раствореннымъ тѣломъ, т. е. отъ состава раствора или сплава [1]).

2) Составъ эвтектики, за исключеніемъ случайныхъ совпаденій, не соотвѣтствуетъ простому атомному соотношенію [2]).

---

[1]) Какъ далѣе будетъ указано въ §§ 126 и 127, въ случаѣ сплавовъ золота съ алюминіемъ, а также сурьмы съ мѣдью, короче говоря, въ случаѣ сплавовъ металловъ, могущихъ образовать опредѣленныя химическія соединенія, эвтектика, образующаяся при избыткѣ одного металла, можетъ отличаться отъ эвтектики, образующейся при избыткѣ другого металла. Другими словами, въ такой серіи сплавовъ можетъ образовываться одна эвтектика на одномъ концѣ серіи и другая на другомъ и цѣлый рядъ промежуточныхъ эвтектикъ у промежуточныхъ сплавовъ. Каждая изъ этихъ эвтектикъ обладаетъ однако опредѣленнымъ составомъ.

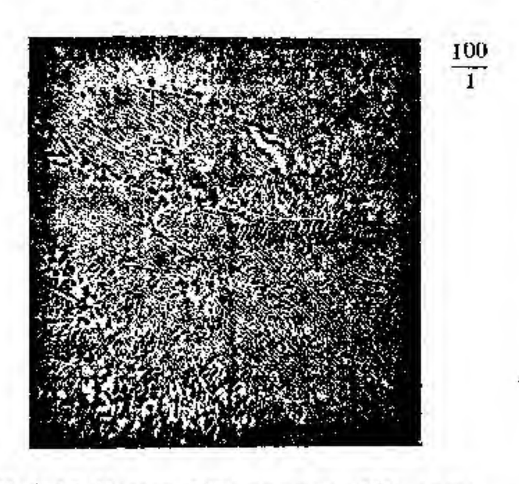
[2]) Guthrie указалъ, что «Утвержденіе, будто бы сплавы съ низшими точками плавленія получаются путемъ смѣшиванія металловъ въ простыхъ кратныхъ отношеніяхъ ихъ атомныхъ вѣсовъ, повидимому, приходится отвергнуть» («On Eutexia», «Phil. Mag.» 5 серія, XVII, 1884 стр. 465.

3) Эвтектика представляетъ собой механическую смѣсь отдѣльныхъ частичекъ двухъ составляющихъ.

Если обѣ составляющихъ эвтектики взаимно растворяются во всѣхъ отношеніяхъ въ твердомъ состояніи, то эвтектика не является въ видѣ механической смѣси, но образуетъ твердый растворъ. Въ томъ же случаѣ, когда обѣ составляющія взаимно растворимы только до ограниченной степени, эвтектика является въ видѣ механической смѣсти частичекъ обѣихъ составляющихъ, при чемъ частички каждой изъ составляющихъ насыщены другой. Короче говоря, это есть механическая смѣсь насыщенныхъ твердыхъ растворовъ обѣихъ составляющихъ. Эти случаи пока можно оставить безъ вниманія. Мы вернемся къ нимъ нѣсколько далѣе (§§ 57, 65 и 68).

Очень характерно, что чаще всего эвтектическая смѣсь состоитъ изъ перемежающихся, но не перекрещивающихся пла-

Эвтектическое строеніе.



$\frac{100}{1}$

Рис. 13. Сплавъ 58% висмута, 42% олова.
Wm. Campbell, лабораторія автора.

стинокъ обѣихъ составляющихъ (рис. 13). Однако въ очень значительномъ числѣ случаевъ составляющія эвтектики, хотя и ясно отличаются другъ отъ друга, но имѣютъ не пластинчатое а сѣтчатое или сферическое строеніе. На рис. 17 видно какъ пластинчатое, такъ и сферическое строеніе, встрѣчающееся бокъ-о-бокъ въ томъ же образцѣ.

Составляющими эвтектики могутъ быть пластинки одного металла, чередующіяся съ пластинками другого, какъ въ сплавахъ свинца съ оловомъ. Или, какъ въ случаѣ раствора соли, составляющими могутъ являться опредѣленныя химическія соединенія; въ данномъ случаѣ пластинки льда чередуются съ пластинками хлористаго натрія. То же самое можно наблюдать и у сплавовъ. Напримѣръ, въ сплавахъ мѣди съ сурьмой (рис. 51) эвтектика образована изъ пластинокъ мѣди, чередующихся съ пластинками, состоящими изъ опредѣленнаго соединенія мѣди съ сурьмой. Подобнымъ же образомъ и ложная эвтектика, «эвтектоидъ», или перлитъ (см. § 148), образующаяся въ стали, состоитъ изъ пластинокъ опредѣленнаго карбида, цементита, Fe_3C, перемежающихся съ пластинками чистаго желѣза или феррита (рис. 63). Эвтектика, образующаяся въ мѣди, содержащей окислы, повидимому, состоитъ изъ пластинокъ закиси мѣди, чередующихся съ пластинками чистой мѣди [1]). Эвтектика, образующаяся въ фосфористомъ желѣзѣ, повидимому, состоитъ изъ пластинокъ опредѣленнаго соединенія желѣза съ фосфоромъ, Fe_3P, перемежающихся съ пластинками, состоящими изъ насыщеннаго твердаго раствора этого соединенія въ желѣзѣ и т. д. и т. д. [2]).

Сплавы трехъ или четырехъ металловъ могутъ содержать эвтектику, состоящую изъ перемежающихся пластинокъ, образованныхъ тремя или четырьмя металлами [3]).

29) Причины, обусловливающія свойства эвтектики. Причины того, что эвтектика, образующаяся при замерзаніи раствора соли, обладаетъ только что перечисленными свойствами, оказываются очень простыми, хотя на первый взглядъ эти свойства и кажутся странными. Эти причины становятся совершенно понятны, если прослѣдить замерзаніе раствора, положимъ, 15 процентовъ соли въ 85 процентахъ воды. Прослѣдимъ вновь процессъ замерзанія. Онъ начинается съ того, что вымерзаетъ небольшое количество чистаго льда; это вызываетъ обо-

---

[1]) Heyn, «Bulletin Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale», CI, стр. 276, 1901.

[2]) Stead, «Journ. Iron and Steel Inst.», II, 1900, стр. 83.

[3]) Guthrie, «Phil. Mag.», 5 серія, XVII, стр. 456—466; Charpy, «Bull. Soc. d' Encourag.», 5 серія, III, стр. 690—691, 1898; «The Metallographist», II, стр. 32, 1899.

гащеніе маточнаго раствора солью, а слѣдовательно и пониженіе его температуры замерзанія, т. е. температуры, до которой его надо охладить, чтобы вызвать дальнѣйшее выдѣленіе льда. Вымерзаніе льда и пониженіе точки замерзанія идутъ рука объ руку, при чемъ все время часть маточнаго раствора остается жидкой, потому что по мѣрѣ паденія температуры съ одинаковой скоростью идетъ и пониженіе точки замерзанія маточнаго раствора, въ силу обогащенія его солью. Такимъ образомъ, маточный растворъ въ каждый данный моментъ находится при точкѣ замерзанія.

Но этому долженъ наступить конецъ. Должна существовать предѣльная температура, при которой никакой растворъ соли въ водѣ не можетъ оставаться жидкимъ. Такой предѣльной температурой является температура замерзанія раствора, содержащаго 23,6% соли, т. е. —22°Ц. По достиженіи этого состава и температуры маточный растворъ долженъ замерзнуть. Ибо только постепенное обогащеніе солью и вызываемое имъ пониженіе точки замерзанія препятствовало замерзанію маточнаго раствора, несмотря на все далѣе идущее пониженіе температуры.

Но положимъ, что содержаніе соли достигло 23,6 процентовъ. Теперь уже дальнѣйшее увеличеніе концентраціи не въ состояніи воспрепятствовать замерзанію маточнаго раствора, потому что увеличеніе концентраціи вмѣсто того, чтобы понижать, повысило бы точку замерзанія; вмѣсто того, чтобы удерживать маточный растворъ отъ замерзанія, оно бы только способствовало послѣднему. Въ каждый данный моментъ охлажденія до достиженія 23,6%, маточный растворъ находится при соотвѣтствующей точкѣ замерзанія и не замерзаетъ только по причинѣ одновременно идущаго пониженія точки замерзанія, вызываемаго вымерзаніемъ воды и, какъ слѣдствіе послѣдняго, увеличенія концентраціи соли въ маточномъ растворѣ. Маточный растворъ въ каждый данный моментъ готовъ замерзнуть, но, начавъ замерзать, онъ теряетъ способность замерзнуть при существующей температурѣ, потому что, выдѣливъ часть воды въ видѣ льда, они становятся богаче солью.

Но когда содержаніе соли достигаетъ 23,6%, и одновременно температура достигаетъ точки замерзанія раствора такого состава, замерзаніе не можетъ уже болѣе быть предотвращено дальнѣйшей дифференціацией, потому что измѣненіе въ составѣ раствора

можетъ только повысить точку замерзанія. Повышеніе же точки замерзанія безъ соотвѣтственнаго повышенія температуры необходимо должно вести къ замерзанію маточнаго раствора.

Такимъ образомъ ясно, почему составъ эвтектики и ея точка замерзанія должны быть постоянны и независимы отъ первоначальнаго состава раствора соли. Ибо, каково бы ни было количественное соотношеніе между солью и водой, необходимымъ усло-

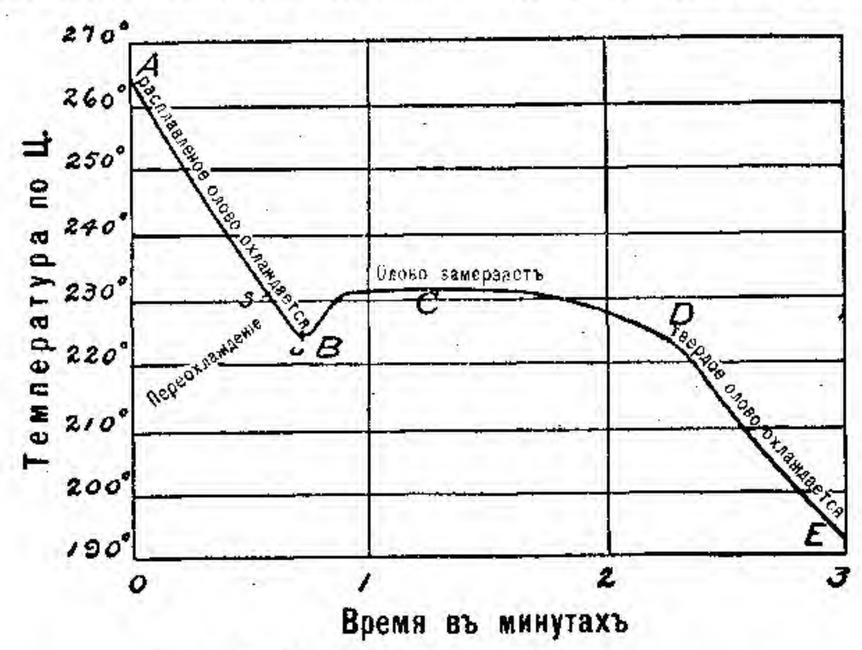


Рис. 14. Кривая охлажденія олова.

(Roberts-Austen, «Third Report Alloys Research Committee», рис. 7, таблица 39).

Обозначенія на этомъ рисункѣ принадлежатъ автору, а не проф. Roberts-Austen'у.

віемъ для того, чтобы маточный растворъ не замерзалъ при охлажденіи, служитъ пониженіе его точки замерзанія, вызываемое измѣненіемъ состава, которое, благодаря вымерзанію одной изъ составляющихъ, всегда происходитъ при охлажденіи. Но это условіе перестаетъ дѣйствовать, когда одновременно съ достиженіемъ предѣльнаго состава (23,6% соли) достигается и точка замерзанія для этого состава. Дальнѣйшее измѣненіе состава уже не можетъ повести къ болѣе низкой точкѣ замерзанія, т. е. никакая возможная комбинація соли и воды не можетъ оставаться жидкой при этой температурѣ. Очевидно, что это обстоятельство уже совершенно не зависитъ отъ первона-

чальнаго состава раствора. Понятно, что чѣмъ ближе первоначальный растворъ къ предѣльному составу (23,6% соли), тѣмъ меньше должно вымерзнуть воды (или соли), для того, чтобы достигнуть его, и тѣмъ больше будетъ количество образовавшейся эвтектики. Но, очевидно, составъ и точка замерзанія эвтектики совершенно отъ этого не зависятъ.

30) Переохлажденіе.—Всѣ эти разсужденія касаются состоянія равновѣсія, т. е. того нормальнаго состоянія, къ которому стремятся описываемыя явленія. Но, несмотря на стремленіе къ равновѣсію, оно не всегда можетъ быть достигнуто, напр., вслѣдствіе переохлажденія. Къ разсмотрѣнію этого явленія мы теперь и перейдемъ.

Давно уже извѣстно, что воду и другія жидкости, при полномъ покоѣ, возможно охладить гораздо ниже ихъ истинной или нормальной точки замерзанія, безъ того, чтобы началось замерзаніе. Но достаточно ихъ встряхнуть, чтобы тотчасъ вызвать замерзаніе, и притомъ настолько быстрое, что, подъ вліяніемъ скрытой теплоты плавленія, температура ихъ быстро поднимается до истинной точки замерзанія, до 0°Ц. въ случаѣ воды.

Вышеизложенное вполнѣ справедливо и по отношенію къ металламъ. Такъ, рис. 14 изображаетъ кривую охлажденія расплавленнаго олова; какъ видно изъ нея, олово охладилось на 5° ниже нормальной точки замерзанія (231°С.), прежде чѣмъ началось замерзаніе. Затѣмъ температура быстро поднялась до 231° и оставалась почти постоянной до конца замерзанія. Это явленіе—когда тѣло остается въ жидкомъ состояніи ниже точки замерзанія—носитъ названіе переохлажденія.

Знакомый примѣръ этого явленія даетъ растворъ сѣрнокислаго натрія. Растворъ этой соли, насыщенный при температурѣ кипѣнія, можно охладить до комнатной температуры безъ кристаллизаціи, несмотря на то, что при этомъ онъ становится очень пересыщеннымъ. Вода удерживаетъ въ растворѣ гораздо больше сѣрнокислаго натрія, чѣмъ она можетъ растворить при комнатной температурѣ, т. е. гораздо больше, чѣмъ это нормально соотвѣтствовало бы ея насыщенію при этой температурѣ. Но достаточно опустить кристаллъ сѣрнокислаго натрія въ этотъ пересыщенный растворъ, чтобы вызвать кристаллизацію. Послѣдняя идетъ очень быстро и распространяется лучеобразно отъ этого кристалла. Для того, чтобы вызвать то же явленіе,

достаточно опустить въ пересыщенный растворъ стеклянную палочку; но если палочку очистить отъ пыли, или прокалить и затѣмъ охладить, кристаллизація можетъ и не наступить.

При опредѣленіи точекъ застыванія сплавовъ, переохлажденіе можетъ вызывать пониженіе обѣихъ точекъ застыванія, т. е. температуры, при которой начинается вымерзаніе металла, находящагося въ избыткѣ, и температуры, при которой начинаетъ замерзать эвтектика. Кривая охлажденія на рис. 15, повидимому, указываетъ на переохлажденіе эвтектики въ сплавѣ олова съ мѣдью, содержащаго около 96% олова и 4% мѣди [1]). Если бы

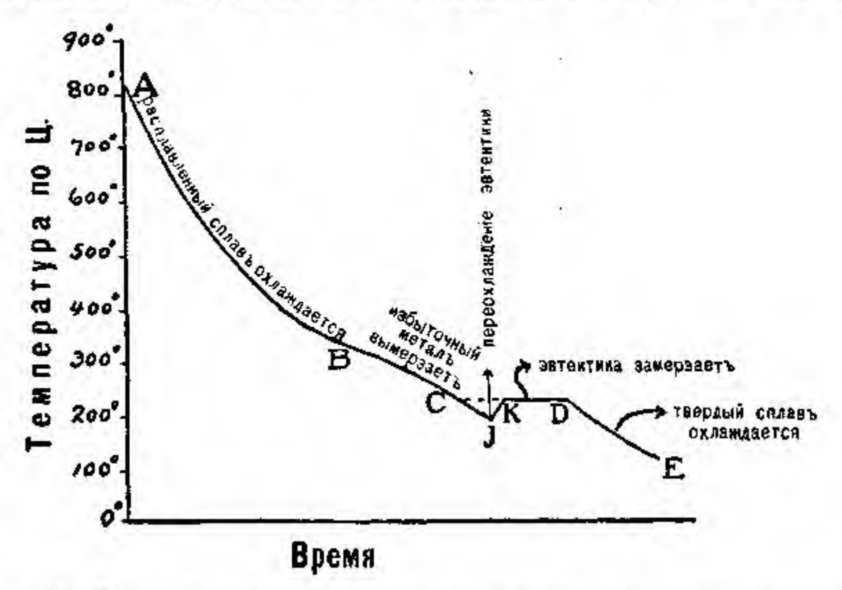


Рис. 15. Переохлажденіе эвтектики; кривая охлажденія сплава олова съ мѣдью: олова 96%, мѣди 4%.

(A. Stansfield, Third Rept. Alloys Research Committee. приложеніе 2, таблица 41).

затвердѣваніе шло нормальнымъ путемъ, безъ переохлажденія, эвтектика начала бы вымерзать при достиженіи температуры, отвѣчающей точкѣ *C*, и кривая охлажденія была бы *ABCKDE*. Нанесенный пунктиромъ участокъ *CK* указываетъ, какъ должно было бы итти затвердѣваніе нормальнымъ путемъ. На самомъ же дѣлѣ замерзаніе эвтектики, повидимому, началось послѣ того, какъ температура упала до *J*. Тепло, освободив-

[1]) «Third Report Alloys Research Committee». Таблица 41. Обозначенія на рисункѣ сдѣланы авторомъ, а не проф. Stansfield'омъ.

шееся при затвердѣваніи, подняло температуру всей массы до K, и остальная часть эвтектики замерзала при постоянной температурѣ KD. Другой примѣръ переохлажденія сплава, образующаго эвтектику можно найти въ § 43.

Для избѣжанія переохлажденія, такъ же, какъ и въ случаѣ, пересыщеннаго раствора сѣрнокислаго натрія, достаточно опустить въ расплавленный сплавъ кусочекъ твердаго сплава, который, являясь центромъ кристаллизаціи, вызоветъ затвердѣніе сплава. Перемѣшиваніе расплавленнаго сплава также препятствуетъ переохлажденію.

Это явленіе напоминаетъ намъ тотъ фактъ, что воду [1]) возможно нагрѣть гораздо выше точки ея кипѣнія 100°Ц., даже до 180°, и она не будетъ кипѣть.

Но если появится центръ, около котораго можетъ начаться кипѣніе, напр. если образуются, или будутъ пропускаться черезъ воду пузырьки достаточной величины какого либо газа, кипѣніе начнется очень быстро и даже бурно. Хорошо извѣстно, что при кипѣніи жидкостей, если помѣстить въ нихъ кусочки какого либо вещества съ неровной поверхностью, можно избѣжать толчковъ. Это явленіе можно отнести на счетъ поверхностнаго натяженія. Внутри массы воды испареніе идетъ легко, когда имѣются пузырьки, внутрь которыхъ она можетъ испаряться. Чѣмъ меньше пузырекъ, тѣмъ большее препятствіе представляетъ собой для кипѣнія его поверхностное натяженіе, т. е. тѣмъ труднѣе проникаетъ газъ при испареніи черезъ его стѣнки.

Безконечно малый пузырекъ, т. е. жидкость, свободная отъ пузырьковъ, представляетъ безконечно большое препятствіе для испаренія. Если вода первоначально содержитъ растворенный воздухъ, или другое какое либо вещество болѣе летучее, чѣмъ она сама, тогда возможно образованіе пузырьковъ, въ которые и идетъ испареніе. Отсюда ясна причина толчковъ при кипѣніи жидкостей, изъ которыхъ кипяченіемъ были удалены всѣ летучія посторонція вещества [2]).

Такимъ образомъ, хотя и существуютъ опредѣленныя температуры, которыя служатъ верхнимъ и нижнимъ предѣломъ

---

[1]) При атмосферномъ давленіи.

[2]) Сравни «Theory of Heat», Maxwell. 1875.

для жидкаго состоянія, при чемъ только въ этихъ предѣлахъ жидкое состояніе является нормальнымъ, однако переходу жидкости въ иное состояніе какъ выше, такъ и ниже этихъ предѣловъ можно воспрепятствовать; она можетъ перейти высшій предѣлъ безъ кипѣнія и низшій безъ замерзанія.

Въ обоихъ случаяхъ жидкость находится въ неустойчивомъ молекулярномъ равновѣсіи, которое можетъ быть нарушено механическимъ путемъ, при введеніи ядра, способнаго вызвать кипѣніе или замерзаніе. Разъ это неустойчивое равновѣсіе нарушено, измѣненіе состоянія, кипѣніе или замерзаніе, идетъ далѣе очень быстро, порой даже бурно, и вещество переходитъ въ молекулярное состояніе, нормальное для существующей температуры.

Намъ важно имѣть въ виду, что переохлажденіе можетъ вызывать искаженіе кривыхъ охлажденія. Въ тѣхъ кривыхъ, которыя были приведены выше, это обстоятельство, для упрощенія, не принималось во вниманіе, вслѣдствіе чего ихъ надо разсматривать только какъ схему.

Когда говорилось объ избирательномъ вымерзаніи, о свойствахъ эвтектики и т. д., то усложненія, вызываемыя переохлажденіемъ, не брались въ расчетъ.

31) Причина сложнаго строенія эвтектики. То, что образующаяся при замерзаніи водныхъ растворовъ соли эвтектика состоитъ изъ чередующихся пластинокъ соли и льда, объясняется взаимной нерастворимостью твердаго льда и твердой соли. (Для краткости я принимаю полную нерастворимость, см. § 51).

Ибо, изъ того обстоятельства, что жидкая вода растворяетъ соль, твердая же вода или ледъ ея не растворяетъ, необходимо слѣдуетъ, что при замерзаніи эвтектики вода и соль не могутъ болѣе оставаться растворенными другъ въ другѣ. Иначе говоря, онѣ взаимно выдѣляются и продолжаютъ далѣе существовать отдѣльно. Почему эти отдѣльныя частички имѣютъ видъ пластинокъ, сказать довольно трудно. Но подобная форма, какъ уже было указано въ § 28, не является общей.

32) Причина того, что составъ эвтектики не отвѣчаетъ простому атомному соотношенію. Совершенно естественно, почему составъ эвтектики не отвѣчаетъ простому атомному соотношенію. Ея составъ одинаковъ съ составомъ раствора (или сплава), обладающаго низшей точкой замерзанія, и нѣтъ никакой причины, почему бы такой растворъ соотвѣтствовалъ простому

атомному соотношенію. Въ сущности говоря, мы скорѣе имѣемъ дѣло съ точкой замерзанія однороднаго жидкаго раствора, а не съ точкой плавленія твердаго тѣла, обладающаго, какъ мы знаемъ, неоднороднымъ строеніемъ. Самая неопредѣленность состава растворовъ и отсутствіе у нихъ ясно выраженныхъ критическихъ точекъ говоритъ противъ того, чтобы ихъ низшая точка плавленія или, говоря вообще, ихъ максимумы или минимумы, отвѣчали простымъ атомнымъ отношеніямъ.

33) Эвтектическій составъ и точка замерзанія эвтектики достигаются одновременно. Одновременное достиженіе эвтектическаго состава и точки замерзанія эвтектики служитъ частнымъ примѣромъ того общаго правила, которое мы наблюдали во время всего хода замерзанія. Мы видѣли (§ 29), что въ каждый данный моментъ во время замерзанія маточная масса начинаетъ замерзать, т. е. находится при точкѣ замерзанія. Что она не замерзаетъ совершенно при данной температурѣ, это объясняется тѣмъ, что, благодаря избирательному вымерзанію, идетъ измѣненіе ея состава, сопровождающееся послѣдовательнымъ пониженіемъ точки замерзанія.

34) Эвтектика и избытокъ одной изъ составныхъ частей. Изъ разсмотрѣнія рис. 8 до 11 можно видѣть, что, каково бы ни было первоначальное процентное отношеніе между солью и водой въ растворахъ соли въ водѣ, при замерзаніи всегда получается эвтектика, содержащая 23,6% соли. Если первоначальное содержаніе соли равняется 30%, т. е. избытокъ ея по отношенію къ эвтектической пропорціи равенъ 6,4%, тогда замерзшая масса будетъ состоять, во-первыхъ, изъ эвтектики въ видѣ перемежающихся слоевъ, и, во-вторыхъ, изъ избыточной соли, въ видѣ отдѣльныхъ кристалловъ, механически заключенныхъ въ эвтектику. Съ другой стороны, положимъ, растворъ содержитъ первоначально 15% соли, такъ что содержаніе воды превышаетъ эвтектическую пропорцію на 8,6%; въ этомъ случаѣ при замерзаніи, какъ и раньше, получится эвтектика того же состава и кромѣ того кристаллы льда, отвѣчающіе избытку въ 8,6%, механически въ нее включенные. Короче говоря, замерзшая масса всегда будетъ представлять собой конгломератъ, состоящій изъ эвтектики, плюсъ вещество, находящееся въ избыткѣ, будь то ледъ или соль. О жидкомъ состояніи мы говорили, что соль растворена въ водѣ, когда количество воды превышаетъ эвтек-

тическую пропорцію; если соль находится въ избыткѣ, можно сказать, что вода растворена въ соли. Съ этой точки зрѣнія вещество, находящееся въ избыткѣ въ твердомъ состояніи, является растворителемъ въ жидкомъ.

34А). Осторожность, необходимая въ отношеніи термина „избыточное вещество“. Необходимо твердо помнить, что при употребленіи термина «избыточное вещество» всегда имѣется въ виду избытокъ надъ эвтектической пропорціей, а не абсолютный избытокъ. Такъ, въ растворѣ, содержащемъ 30% соли и 70% воды, соль является въ избыткѣ, потому что содержаніе ея превышаетъ эвтектическую пропорцію, равную 23,6 процентамъ. Въ этомъ смыслѣ соль находится въ избыткѣ, несмотря на то, что абсолютное ея количество меньше половины входящей въ составъ раствора воды. Въ другихъ случаяхъ избыточное вещество можетъ находится еще въ меньшемъ отношеніи къ другому веществу, присутствующему въ недостаточномъ количествѣ.

Тотъ фактъ, что избыточное вещество можетъ находиться въ абсолютно значительно меньшемъ количествѣ, чѣмъ вещество, являющееся въ недостаткѣ, конечно, служитъ не въ пользу этого термина, такъ какъ онъ легко можетъ вести къ недоразумѣніямъ. По этой причинѣ выраженіе «гиперъ-эвтектическое вещество» имѣетъ то преимущество, что яснѣе указываетъ на избытокъ именно надъ эвтектическимъ отношеніемъ. Но краткость и удобство выраженія «избыточное вещество» побуждаютъ пользоваться имъ въ дальнѣйшемъ изложеніи. Для большей ясности приведемъ слѣдующую аналогію. Положимъ, что въ нормальный составъ роты пѣхоты входятъ одинъ офицеръ и сто солдатъ. Представимъ себѣ, что въ какой-нибудь ротѣ десять офицеровъ и только девяносто солдатъ. Съ полнымъ правомъ мы могли бы сказать, что въ этой ротѣ избытокъ офицеровъ, и каждому было бы совершенно ясно, что мы говоримъ не объ абсолютномъ избыткѣ офицеровъ надъ солдатами, но только объ избыткѣ ихъ надъ нормальнымъ отношеніемъ 1 : 100.

35) Періодъ вымерзанія избыточнаго вещества и періодъ замерзанія эвтектики. Изъ только что сказаннаго слѣдуетъ, что подраздѣленіе на періодъ вымерзанія льда и періодъ замерзанія эвтектики, сдѣланное въ § 24, надо замѣнить болѣе

общимъ подраздѣленіемъ на 1) періодъ вымерзанія избыточнаго вещества и 2) періодъ замерзанія эвтектики (*BC* и *CD* на кривыхъ охлажденія). Такое подраздѣленіе можетъ быть примѣнено къ весьма многочисленнымъ сплавамъ, образующимъ эвтектику (§§ 47 до 52).

35A). Причины сферолитнаго строенія нѣкоторыхъ сплавовъ. Мои собственныя наблюденія убѣдили меня въ томъ, что за нормальное строеніе эвтектики надо признать строеніе въ видѣ чередующихся пластинокъ. Сферолитное же строеніе обязано своимъ происхожденіемъ сліянію или коагулированію частичекъ одной или обѣихъ составляющихъ эвтектики, первоначально существовавшихъ отдѣльно. Въ самомъ дѣлѣ, отдѣльныя частички каждой составляющей могутъ слиться въ большія, но все же отдѣльныя зерна. Мною было найдено, что при очень медленномъ охлажденіи сплава, состоящаго по вѣсу изъ 96,70% мѣди и 3,30% серебра, эвтектика на первый взглядъ совершенно отсутствуетъ. Въ массѣ мѣди серебро виднѣлось только въ видѣ отдѣльныхъ небольшихъ островковъ. Въ серединѣ послѣднихъ въ видѣ точекъ кое-гдѣ можно было видѣть мѣдь. Это совершенно отвѣчало моимъ ожиданіямъ, несмотря на то, что, какъ извѣстно, такого рода сплавъ при обычной скорости охлажденія образуетъ небольшое количество эвтектики, на ряду съ главной массой, состоящей изъ мѣди, содержащей серебро.

Это объясняется чрезвычайно просто. Эвтектика несомнѣнно состояла первоначально изъ пластинокъ мѣди, содержащей серебро, и пластинокъ серебра, содержащаго мѣдь. Но, находясь продолжительное время при температурѣ очень немного ниже точки замерзанія, частички мѣди перешли изъ эвтектики и слились съ окружающей ихъ массой мѣди. Въ то же время частички серебра слились между собой, и такимъ образомъ пластинчатое строеніе было нарушено. Включенная въ серебро мѣдь представляетъ собой частички, которыя еще не успѣли слиться съ окружающей массой мѣди.

Точно также, при нагрѣваніи въ теченіе семи часовъ при температурѣ немного ниже точки замерзанія эвтектики, сплава, содержащаго 62,98% серебра и 37,02% мѣди, получились схожіе результаты. Нормальнымъ образомъ этотъ сплавъ долженъ былъ бы состоять изъ 1) мѣди, какъ избыточнаго металла и 2) эвтектики; при обыкновенныхъ условіяхъ получились бы

участки мѣди, окруженные эвтектикой. Но въ этомъ сплавѣ мною было замѣчено, что участки мѣди окружены поясомъ серебра, свободнаго отъ пластинокъ мѣди. Изъ этого я заключаю, что пластинки мѣди эвтектики слились съ избыточной мѣдью.

Эвтектика, хотя и сохранила свои характерныя черты, но все же до извѣстной степени утратила пластинчатое строеніе, и значительная часть пластинокъ мѣди образовала скопленія, расположенныя рядомъ.

Такого рода сліяніе и передвиженіе частичекъ можно сравнить съ движеніемъ пузырьковъ, плавающихъ на поверхности воды въ стаканѣ. Пузырьки, находящіеся ближе къ краю, быстро движутся наружу и прикрѣпляются къ стѣнкамъ стакана. Находящіеся ближе къ центру притягиваются слабѣе стѣнками стакана, при чемъ притяженіе одной стѣнки отчасти парализуется притяженіемъ другой. Въ силу этого они движутся очень медленно, но послѣ достаточнаго промежутка времени также достигаютъ стѣнокъ стакана.

Совершенно подобнымъ же образомъ, мнѣ кажется, можно объяснить и сферолитное строеніе нѣкоторыхъ эвтектикъ. Если поддерживать въ теченіе извѣстнаго промежутка времени достаточно высокую температуру, то, благодаря большой подвижности частичекъ, пластинки одной изъ составляющихъ эвтектики должны слиться и образовать сферическія скопленія, наподобіе капель масла въ водѣ.

Иногда указывалось на то, что въ сплавѣ, содержащемъ эвтектику, не могутъ одновременно существовать «структурно-свободныя» частички обѣихъ составляющихъ эвтектики. Это совершенно невѣрно. Правда, обѣ составляющія не могутъ быть одновременно въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи. Напримѣръ, если серебро находится въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи, мѣдь не можетъ быть одновременно въ избыткѣ. Нѣтъ, однако, никакой причины, почему бы частички каждой составляющей эвтектики въ отдѣльности не могли слиться и образовать настолько значительныя массы, что послѣднія будутъ производить впечатлѣніе структурно-свободныхъ. Необходимо признать, что структурно-свободныя частички могутъ появляться совершенно случайно. Какъ видно изъ вышеприведеннаго случая, недостаточный металлъ можетъ образовывать структурно-свободныя массы. На этомъ основаніи выра-

женія «избыточный металлъ» и «недостаточный металлъ» можно считать болѣе точнымъ, чѣмъ «структурно-свободный металлъ».

Если это справедливо, тогда пластинчатое строеніе эвтектики можно разсматривать, какъ случайный признакъ. Основными же признаками надо считать то, что эвтектика представляетъ собой сплавъ съ низшей точкой плавленія, и то, что ея составляющія расположены отдѣльно. Изъ нихъ главнымъ признакомъ надо считать, очевидно, первый.

35В) Вліянія, оказываемыя строеніемъ эвтектики. Меня часто приводила въ недоумѣніе большая степень ковкости, которую удавалось придавать нѣкоторымъ сортамъ стали путемъ очень медленнаго охлажденія. Возможно, что причина этого явленія заключается въ вышеуказанномъ измѣненіи въ строеніи эвтектики. Во всякомъ случаѣ этотъ вопросъ заслуживаетъ изученія. Какъ далѣе будетъ указано, сталь представляетъ собой сплавъ, образующій эвтектику, при чемъ двумя составляющими этой quasi-эвтектики являются листочки твердаго и ломкаго цементита, Fe_3C, и листочки мягкаго, какъ мѣдь, феррита или чистаго желѣза. Очень вѣроятно, что продолжительное пребываніе при высокой температурѣ, неизбѣжное при очень медленномъ охлажденіи, можетъ способствовать измѣненію первоначальной формы листочковъ цементита и принятію ими сферической формы. Далѣе, совершенно естественно предположить, что цементитъ въ видѣ сферическихъ зеренъ будетъ оказывать меньшее вліяніе на ковкость всей массы стали, чѣмъ то же количество цементита въ видѣ листочковъ съ острыми краями. Даже частичный переходъ листочковъ цементита въ сферическую форму долженъ бы дѣйствовать въ томъ же направленіи, хотя и въ меньшей степени.

36) Параллелизмъ между многими сплавами и водными растворами соли. Многіе сплавы, напримѣръ сплавы свинца съ оловомъ, имѣютъ очень большое сходство съ изученными выше водными растворами соли. Подобно послѣднимъ, свинецъ съ оловомъ образуютъ эвтектику, представляющую собой механическую смѣсь перемежающихся пластинокъ свинца и олова. Ея составъ постояненъ, хотя и не отвѣчаетъ атомному отношенію, именно 31% свинца и 69% олова. Отсюда слѣдуетъ, что и точка замерзанія ея постоянна. Любой твердый сплавъ свинца съ оловомъ состоитъ изъ одной эвтектики, или содер-

житъ кромѣ того избытокъ олова или свинца, въ зависимости отъ того, содержитъ ли сплавъ, какъ цѣлое, точно 31% свинца и 69% олова, или избытокъ того или другого металла сверхъ этой пропорціи.

Кривыя охлажденія чистаго свинца, чистаго олова и сплава ихъ въ отношеніи 31 : 69 (рис. 28 A, 28 G, 28 E) можно сравнить съ кривыми охлажденія чистой воды, чистой соли и раствора эвтектическаго состава (23,6% соли). Какъ тѣ, такъ и другія указываютъ на неизбирательное замерзаніе и имѣютъ только одинъ горизонтальный участокъ (*BD* или *CD*). Кривыя охлажденія сплавовъ, содержащихъ избытокъ свинца или олова (напримѣръ 67% свинца, 33% олова, рис. 28 C, и 85% олова, 15% свинца, рис. 28 F), похожи на кривыя охлажденія водныхъ растворовъ соли, содержащихъ избытокъ воды или соли сверхъ эвтектической пропорціи (рис. 8, 9 и 11). Здѣсь уже замерзаніе идетъ избирательное, сопровождающееся вымерзаніемъ избыточнаго вещества (участокъ *BC*). Вымерзаніе избыточнаго металла вызываетъ обогащеніе маточнаго металла недостаточнымъ металломъ (оловомъ, если свинецъ въ избыткѣ; свинцомъ, если въ избыткѣ олово). Это вымерзаніе начинается при температурѣ низшей, чѣмъ точка замерзанія избыточнаго металла (при чемъ она тѣмъ ниже, чѣмъ ближе составъ сплава, какъ цѣлаго, къ эвтектическому составу) и захватываетъ довольно значительный температурный интервалъ (закругленная часть кривой *BC*). Оканчивается вымерзаніе избыточнаго металла съ началомъ замерзанія эвтектики при постоянной температурѣ 180°, которой соотвѣтствуетъ горизонтальный участокъ *CD*.

37) Расслаиваніе сообразно плотности. Какъ извѣстно, при неполномъ замерзаніи какого-*либо* бассейна, ледъ, какъ болѣе легкое вещество, плаваетъ на поверхности воды,—вещества болѣе тяжелаго; это можетъ дать поводъ предположить, что и въ сплавахъ при затвердѣваніи составныя части будутъ расслаиваться сообразно плотности. Такое предположеніе вполнѣ естественно. На самомъ же дѣлѣ такое расслаиваніе наблюдается рѣдко, за исключеніемъ тѣхъ сплавовъ, которые въ расплавленномъ состояніи распадаются на не смѣшивающіяся между собою части. Въ такихъ случаяхъ, конечно, расслаиваиваніе будетъ очень рѣзко выражено. Но едва ли можно ожидать замѣтнаго расслаиванія въ сплавахъ совершенно однородныхъ въ жидкомъ со-

стояніи и только при затвердѣваніи распадающихся на отдѣльныя составляющія, какъ эвтектика и избыточный металлъ.

Въ случаѣ образованія льда на поверхности бассейна сами условія замерзанія способствуютъ разслаиванію. Охлажденіе идетъ съ поверхности; вода съ низшей температурой является самой легкой и подымается къ поверхности (принимается, что вся масса воды имѣетъ температуру ниже 8°Ц.); здѣсь образуется ледъ и, какъ болѣе легкое вещество, остается на поверхности. Другое дѣло, если мы будемъ замораживать воду въ небольшомъ желѣзномъ сосудѣ съ шероховатыми внутренними стѣнками, а особенно если мы прикроемъ поверхность воды опилками для того, чтобы задержать отдачу тепла съ поверхности и сосредоточить охлажденіе на стѣнкахъ сосуда. Тогда замерзаніе пойдетъ сперва на стѣнкахъ, и частички льда по мѣрѣ образованія будутъ скорѣе стремиться пристать къ нимъ, чѣмъ подыматься къ поверхности.

Подобнымъ же образомъ идетъ и замерзаніе массы металла. Замерзаніе скорѣе всего идетъ со дна и со сторонъ, благодаря соприкосновенію съ холодными стѣнками формы, и гораздо медленнѣе съ поверхности, къ которой конвекціонными токами доставляются наиболѣе горячія и легкія частички расплавленнаго металла. Такимъ образомъ, замерзающая первой часть металла образуетъ тонкую оболочку по стѣнкамъ и на днѣ формы, оболочку, которая даже если бы и была легче расплавленнаго металла, не могла бы подняться къ поверхности, потому что удерживается стѣнками формы, а также часто и вслѣдствіе вида послѣдней. На этотъ слой отлагается слѣдующій и т. д.

Разслаиванію препятствуютъ еще и другія причины. Обратимся опять къ сплаву свинца съ оловомъ (рис. 28 F). Кристаллы олова не обязательно покидаютъ маточный металлъ, какъ ледъ, собирающійся на поверхности бассейна, но удерживаются въ немъ частью механически, частью пристаютъ къ стѣнкамъ формы. Это объясняется тѣмъ, что охлажденіе сплава идетъ обыкновенно очень быстро, и кристаллы олова, выпадающіе на участкѣ отъ B до C, не только очень малы, но и крайне близки по плотности къ маточному металлу, изъ котораго они образуются; къ тому же и маточный металлъ во время ихъ образованія относительно вязокъ, особенно по сравненію съ воднымъ растворомъ. При разсматриваніи шлифа такого

сплава подъ микроскопомъ, можно видѣть, что мелкіе кристаллы избыточнаго олова распредѣлены во всей массѣ съ такой же приблизительно равномѣрностью, какъ кристаллы полевого шпата въ гранитѣ.

Нѣтъ никакого сомнѣнія, что по той же причинѣ и въ горныхъ породахъ минералы, часто очень различной плотности,

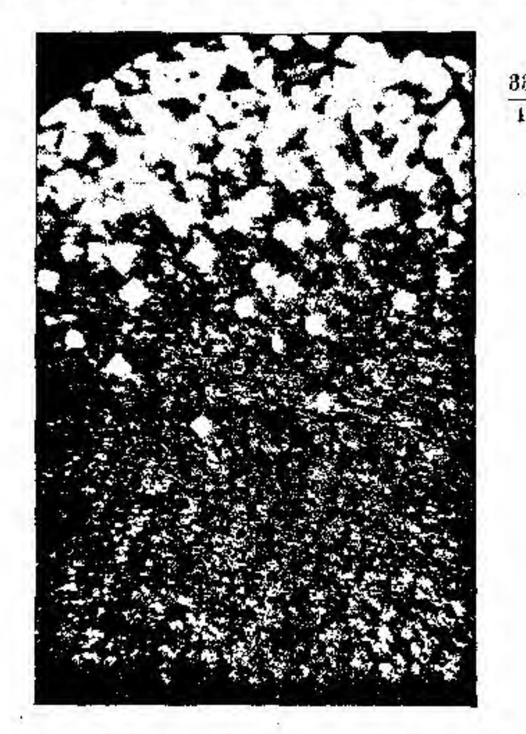


Рис. 16. Сплавъ 90% олова, 10% сурьмы.

На этомъ рисункѣ можно видѣть кубы антимонида олова (SnSb), всплывшіе въ верхнюю часть болванки, подъ вліяніемъ меньшаго удѣльнаго вѣса.
William Campbell, лабораторія автора.

встрѣчаются вмѣстѣ, а не образуютъ сообразно плотности, отдѣльныхъ слоевъ.

Если вести охлажденіе сплава настолько медленно, чтобы замерзаніе шло въ теченіе многихъ часовъ, тогда, при благопріятныхъ условіяхъ, можно наблюдать разслаиваніе сообразно плотности. Примѣромъ можетъ служить графитъ, образующійся при застываніи чугуна въ «mixer» (см. § 285) на большихъ металлургическихъ заводахъ. Графитъ настолько легче желѣза, въ которомъ онъ образуется, и затвердѣваніе идетъ настолько медленно, что

большая его часть подымается на поверхность и разлетается въ видѣ пыли по зданію (§ 191). Въ другихъ сплавахъ, составляющія которыхъ сильно отличаются по плотности, разслаиваніе можно обнаружить подъ микроскопомъ. Такъ, въ сплавахъ висмута съ оловомъ, микроструктура которыхъ изображена на рис. 16 и 37, кубы, образующіеся при застываніи, могутъ достигнуть такой величины, если охлажденіе ведется очень медленно, что, не будучи въ состояніи удерживаться стѣнками образовавшейся вокругъ массы сплава коры, всплываютъ кверху. По окончаніи охлажденія, это можно ясно видѣть на шлифѣ. Рис. 16 показываетъ, какъ такіе маленькіе кубы поднялись къ поверхности расплавленной массы.

38) Микроструктура. Всѣ тѣ явленія, изученіемъ которыхъ мы выше занимались, какъ-то, замерзаніе избыточнаго вещества и послѣдующее замерзаніе эвтектики, находятъ себѣ отраженіе въ микроструктурѣ сплава.

Такъ, на шлифѣ сплава мѣди съ серебромъ, болѣе богатомъ мѣдью, чѣмъ соотвѣтствуетъ эвтектической пропорціи, 72% серебра и 28% мѣди, видна избыточная мѣдь въ видѣ небольшихъ кристалловъ, расположенныхъ на-подобіе листа папоротника или елочки. При замерзаніи мѣдь расположилась соотвѣтственно опредѣленнымъ кристаллическимъ осямъ, образовавъ стволъ и вѣтви елочки, при чемъ она раздвинула еще находящуюся въ жидкомъ состояніи эвтектику. Послѣдняя, достигнувъ точки замерзанія, расположилась между вѣтвями елочки.

Въ данномъ случаѣ мы имѣемъ примѣръ того, какъ по микроструктурѣ можно заключать относительно порядка возникновенія различныхъ составляющихъ. Можно принять за правило, что тѣ составляющія, которыя возникаютъ раньше, принимаютъ свойственную имъ кристаллическую форму, потому что въ то время, какъ онѣ затвердѣваютъ, остальная часть расплавленной массы находится еще въ жидкомъ состояніи и не препятствуетъ ихъ росту. Тѣ же составляющія, которыя образуются позже, вслѣдствіе болѣе поздняго замерзанія, при самомъ своемъ возникновеніи испытываютъ препятствіе со стороны ранѣе ихъ возникшихъ кристалловъ и принуждены занимать остающееся свободнымъ пространство между послѣдними. Однимъ словомъ, застывающія раньше вещества образуютъ «идіоморфные» кри-

сталлы или кристаллическія группы, застывающіе позже— «псевдоморфные» (Объясненіе этихъ терминовъ см. въ § 39).

Группа кристалловъ въ видѣ елочки или листа папоротника, какъ на рис. 17, конечно, имѣетъ видъ группы идіоморфныхъ кристалловъ. Даже если бы не было другихъ данныхъ относи-



Рис. 17. Сплавъ мѣди съ серебромъ, обладающій эвтектикой. Окрашенъ нагрѣваніемъ.

Темные, подобные листьямъ папоротника, кристаллы представляютъ собою избыточный металлъ, мѣди, содержащую серебро. Эвтектика имѣетъ какъ пластинчатый, такъ и сфероидальный видъ.

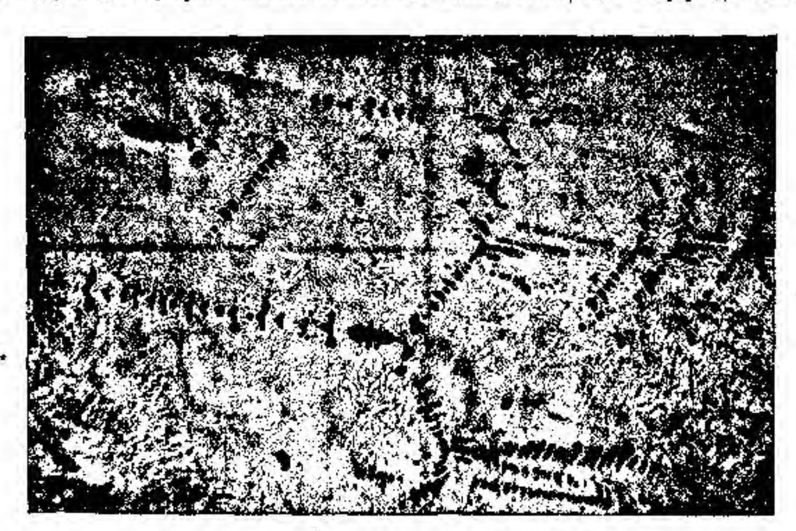
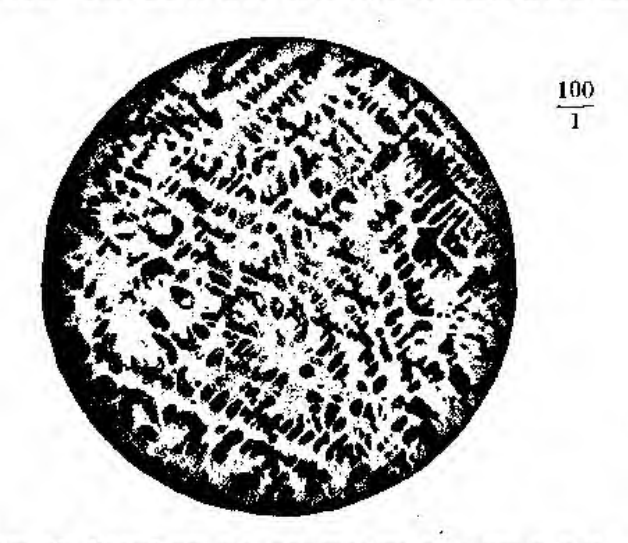


Рис. 18. Сплавъ 80% мѣди, 20% серебра.

Черная сѣтка изъ дендритовъ представляетъ собою избытокъ мѣди сверхъ эвтектической пропорціи. Внутри петель сѣтки расположена эвтектика. Эвтектика представляетъ собою сплавъ Levol'я 28,1% мѣди, 71,9% серебра.

Изготовленъ E. J. Halle, въ лабораторіи автора, для настоящей книги.

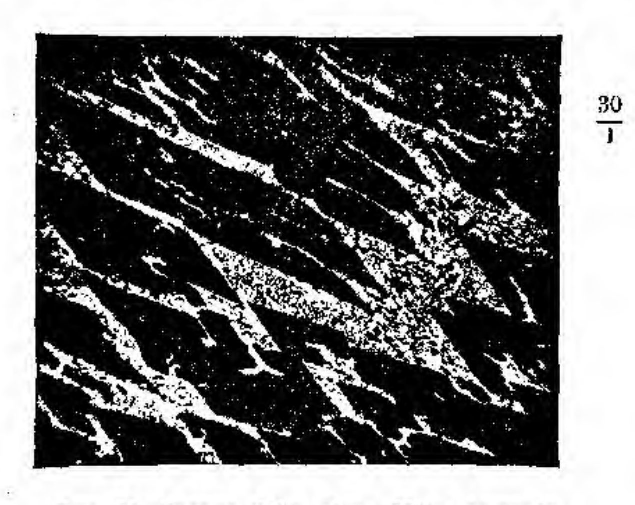
тельно исторіи ея происхожденія, мы сказали бы, что она болѣе ранняго происхожденія, эвтектика же, расположенная въ промежуткахъ, болѣе поздняго. Это еще лучше выражено на рис. 18



$\frac{100}{1}$

Рис. 19. Бѣлый чугунъ, протравленъ растворомъ іода.

F. Osmond, частное сообщеніе; см. также «The Metallographist», III, 197.



$\frac{30}{1}$

Рис. 20. Сплавъ 45% мѣди, 55% алюминія.

Изготовленъ William Campbell, въ лабораторіи автора.

и 19; темные ряды древовидныхъ сростковъ кристалловъ, повидимому, образовались въ жидкой средѣ, не препятствовавшей ихъ росту.

Гораздо труднѣе разобраться въ полигональной структурѣ, примѣромъ которой могутъ служить рис. 1 и 2. Съ перваго взгляда трудно сказать, которую изъ составляющихъ надо считать идіоморфной и которую псевдоморфной: темную сѣтку или заключенные въ ея просвѣтахъ свѣтлые многоугольники.

За первенство образованія темной сѣтки говоритъ то, что отростки, идущіе отъ нея, проникаютъ во внутрь просвѣтовъ и мѣстами образуютъ правильно расположенныя полосы. Если бы сѣтка образовалась послѣ затвердѣнія многоугольниковъ, очень мало вѣроятія за то, чтобы идущіе отъ нея отростки могли проникнуть въ сравнительно уже твердые многоугольники.

Независимо отъ этого, мы знаемъ относительно рис. 1 изъ данныхъ Osmond'а, выраженныхъ въ діаграммѣ Roberts-Austen'а (рис. 68), что темная сѣтка феррита болѣе ранняго происхожденія, чѣмъ свѣтлые многоугольники перлита (см. § 169).

Дальнѣйшее разсмотрѣніе структуры этого типа (рис. 21 до 23) подтверждаетъ, что избыточное вещество, ферритъ (на этихъ рисункахъ являющійся болѣе свѣтлой составляющей), по происхожденію старше основной массы, quasi-эвтектики или перлита; на это указываетъ опять-таки расположеніе отростковъ феррита въ перлитѣ.

Въ другихъ случаяхъ эвтектика образуетъ сѣтку, избыточное же вещество—многоугольники, какъ на рис. 20.

Здѣсь многоугольники болѣе ранняго, сѣтка же болѣе поздняго происхожденія, въ противоположность вышеприведенному случаю (рис. 1 и 2).

Такого рода различіе въ распредѣленіи избыточнаго вещества, расположеннаго въ сплавѣ то въ видѣ сѣтки, то въ просвѣтахъ послѣдней, вызывается различіемъ въ кристаллизаціи избыточнаго вещества. Всѣмъ хорошо извѣстно, какія разнообразныя формы можетъ принимать ледъ при различныхъ условіяхъ—таковы изумительныя по красотѣ гексагональныя звѣздочки снѣга въ очень холодные дни, древовидные узоры на окнахъ, крупные столбики въ кускахъ искусственнаго льда. Подобное же разнообразіе наблюдается и у многихъ другихъ минераловъ.

Вообще, въ тѣхъ сплавахъ, гдѣ избыточное вещество образуетъ древовидные или полые кристаллы, или же, наконецъ, цѣлую систему кристалловъ, охватывающихъ извѣстное про-

33/1

Рис. 21.

Рис. 22.

65/1

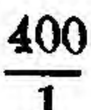


Рис. 23.

Рис. 21—23. На этихъ рисункахъ можно видѣть, какъ отростки избыточнаго вещества (феррита) проникаютъ въ эвтектоидъ (перлитъ).

Изъ болванки гипо-эвтектоидной стали.

Углеродъ 0,56; кремній 0,14; марганецъ 0,18; фосфоръ 0,02; сѣра 0,02. Изготовлены W. A. Bentley, въ лабораторіи автора, для настоящей книги. Изъ одной и той же области того же образчика.

Рис. 21 указываетъ расположеніе сѣтки. Рис. 23 увеличенъ до степени, при которой видно строеніе перлита. Рис. 22 представляетъ собою переходную степень между рис. 21 и 23.

странство, тамъ оно имѣетъ стремленіе являться въ видѣ сѣтки, эвтектика же заполняетъ промежутки между вѣтвями или пластинками. Иное дѣло, когда избыточное вещество образуетъ крупные отдѣльные кристаллы, изъ которыхъ каждый растетъ вокругъ отдѣльнаго центра, напримѣръ, въ видѣ кубовъ; въ этихъ случаяхъ избыточное вещество стремится заполнить просвѣты сѣтки и вытѣснить маточный металлъ въ промежутки между кристаллами. Иногда маточный металлъ при этомъ образуетъ эвтектику. Сначала промежутки между кристаллами занимаютъ большую часть всей массы, но по мѣрѣ роста отдѣльныхъ кристалловъ промежутки все уменьшаются и въ концѣ концовъ образуютъ только сѣтку. На эти обобщенія не надо смотрѣть какъ на правила, которыя можно прилагать во всѣхъ случаяхъ. Они имѣютъ цѣлью дать только общее понятіе о ростѣ кристалловъ и помочь при опредѣленіи порядка образованія различныхъ составляющихъ на основаніи расположенія кристалловъ.

39) Опредѣленіе. Идіоморфнымъ называется кристаллъ, когда онъ принимаетъ форму только подъ вліяніемъ кристаллическихъ силъ образующаго его вещества. Въ отличіе отъ идіоморфнаго, кристаллъ называютъ псевдоморфнымъ, когда форма его зависитъ и отъ другихъ причинъ, какъ, напримѣръ, отъ формы того пространства, въ которомъ заключено данное вещество, или же отъ формы того вещества, которое оно замѣнило, и т. д.

Часто можно получить цѣнныя указанія относительно порядка образованія составляющихъ при помощи опредѣленія, которыя изъ нихъ представляютъ собою идіоморфные кристаллы, или кристаллы, форма которыхъ указывала бы на то, что они образовались свободно въ жидкой или пластической средѣ, и которые просто занимаютъ пространство, оставшееся свободнымъ послѣ кристаллизаціи другой составляющей. Этимъ критеріемъ надо однако пользоваться съ осторожностью. Такъ, на рис. 20 нѣкоторые отростки эвтектики, проникающіе въ темную массу, какъ будто указываютъ на то, что они идіоморфны. Но при болѣе близкомъ разсмотрѣніи видно, что эти отростки въ дѣйствительности зависятъ отъ оріентировки темныхъ кристалловъ; слѣдовательно, эвтектика не образовала въ раннемъ періодѣ отростковъ, которые затѣмъ сохранились, а заняла просто оставшіяся свободными пространства въ ранѣе возникшихъ кристаллахъ.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

Кривыя замерзанія.

40) Физическія свойства серіи сплавовъ. Система, въ которой измѣненіе критическихъ точекъ или критическаго состава происходитъ на всемъ протяженіи серіи. Значеніе такого рода изслѣдованій яснѣе выступитъ при изученіи какого-либо одного свойства; при этомъ лучше всего начать съ «кривыхъ замерзанія», представляющихъ большую важность.

41) Кривыя замерзанія. При разсмотрѣніи кривыхъ охлажденія (рис. 8, 9, 11 и 28 B, C, D и F) обращаютъ на себя вниманіе двѣ критическія температуры: *B*, при которой начинается вымерзаніе избыточнаго вещества, и *CD*, при которой оно оканчивается и наступаетъ замерзаніе эвтектики. Для краткости, обѣ эти температуры мы можемъ назвать точками замерзанія, указывая при этомъ, къ какому сплаву, напримѣръ, олова съ свинцомъ, онѣ относятся.

Для того, чтобы сопоставить и сравнить между собой полученныя кривыя охлажденія и выяснить ходъ измѣненія точекъ замерзанія при переходѣ отъ чистаго свинца, черезъ рядъ сплавовъ свинца съ оловомъ, къ чистому олову, нанесемъ, какъ на рис. 24, положеніе этихъ двухъ точекъ замерзанія, принявъ температуру за ординаты, а процентное содержаніе олова за абсциссы.

При этомъ верхнія точки замерзанія расположатся на кривой *ABC*, имѣющей форму V, точки же замерзанія эвтектики—

на горизонтальной линіи *aBc*, какъ бы подчеркивающей кривую *ABC*[1]).

Обратимъ вниманіе на основную черту такого рода кривыхъ,— на то, что онѣ имѣютъ видъ подчеркнутаго V. На линіи *AB* расположены температуры, при которыхъ начинаетъ вымерзать свинецъ изъ расплавленныхъ сплавовъ свинца съ оловомъ, содержащихъ избытокъ свинца сверхъ эвтектической пропорціи (31%); линія *AB* начинается при 326°, точкѣ плавленія чистаго свинца, и кончается при 180°, точкѣ замерзанія эвтектики. Точно такимъ же образомъ, на линіи *BC* расположены температуры, при которыхъ начинается вымерзаніе олова изъ сплавовъ олова съ свинцомъ, содержащихъ свинца менѣе 31%, или, другими словами, содержащихъ избытокъ олова сверхъ эвтектической пропорціи. Линія *aBc* соотвѣтствуетъ температурѣ, при которой застываетъ эвтектика всѣхъ сплавовъ этой серіи [2]).

---

[1]) Необходимо твердо помнить, что каждая точка на подобнаго рода діаграммахъ въ одно и то же время обозначаетъ извѣстную температуру и извѣстный составъ. Первая измѣряется перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ этой точки на горизонтальную ось, второй—перпендикуляромъ на вертикальную ось. Напримѣръ, точка *B* относится къ температурѣ 180° и къ составу 31% свинца и 69% олова.

[2]) Для того, чтобы съ большей ясностью представить себѣ отношеніе между кривой замерзанія и отдѣльными кривыми охлажденія, прослѣдимъ охлажденіе *какого-нибудь сплава, напримѣръ, содержащаго* 55% *свинца*, т. е. съ избыткомъ свинца въ 24% сверхъ эвтектической пропорціи. При этомъ будемъ помнить, что кривая замерзанія получается путемъ нанесенія точекъ замерзанія, опредѣляемыхъ изъ кривыхъ охлажденія отдѣльныхъ сплавовъ. Положимъ, что сплавъ былъ нагрѣтъ выше точки плавленія, скажемъ, до 350°Ц. Охлажденіе слѣдуетъ по линіи *CHIK*, минуя температуру 326°— точку замерзанія свинца, при чемъ замерзанія не наступаетъ. Свинецъ остается расплавленнымъ ниже своей точки замерзанія, потому что новое вещество, сплавъ свинца съ оловомъ, обладаетъ болѣе низкой точкой замерзанія. Олово, растворенное въ свинцѣ, понижаетъ точку замерзанія послѣдняго. Только когда температура достигаетъ приблизительно 225°, начинается замерзаніе свинца. По мѣрѣ пониженія температуры отъ *H* до *I* кристаллы свинца продолжаютъ выдѣляться изъ жидкаго сплава, и въ то же время маточный металлъ соотвѣтственно обогащается оловомъ. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ 180°, когда маточный металлъ настолько обѣднѣетъ свинцомъ, что содержаніе его достигнетъ 31%. Короче говоря, маточный металлъ достигнетъ одновременно точки замерзанія и эвтектическаго состава. При этомъ дальнѣйшее охлажденіе останавливается,

42) Двоякое значеніе V-образныхъ кривыхъ. Мы уже видѣли въ § 29, что во время избирательнаго замерзанія маточный металлъ въ каждый данный моментъ находится при точкѣ замерзанія. По мѣрѣ постепеннаго пониженія температуры маточный металлъ измѣняетъ свой составъ такимъ образомъ, что въ каждый данный моментъ его точка замерзанія соотвѣтствуетъ существующей температурѣ. Разъ *AB* служитъ мѣстомъ расположенія точекъ замерзанія сплавовъ различнаго состава, содержащихъ отъ 100% свинца до 31%, отсюда слѣдуетъ, что *AB*, во время избиратель-

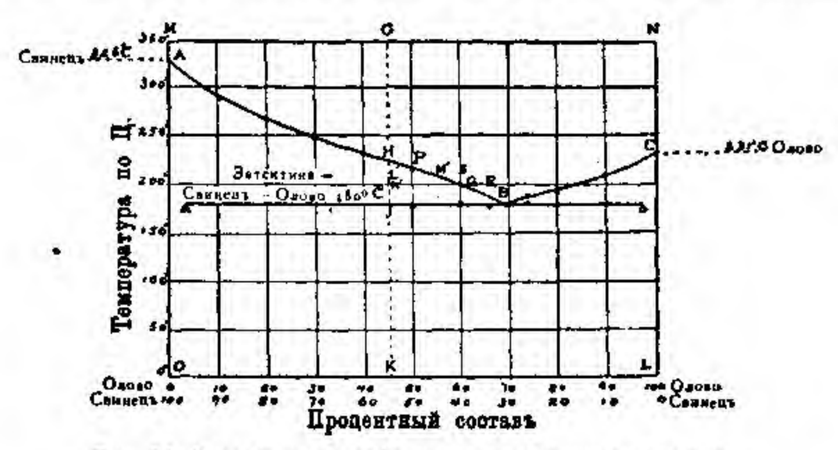


Рис. 24. Кривая замерзанія сплавовъ свинца съ оловомъ.
Roberts-Austen, «Fourth Rept. Alloys Research Committee», рис. 5, таблица 4, 1897.

наго замерзанія, выражаетъ также составъ и температуру маточнаго раствора (рис. 24).

Такъ, замерзаніе раствора, содержащаго, напр., 55% свинца и 45% олова (*GK*, рис. 24) начинается при 225° (*H*) и по мѣрѣ

благодаря теплу, выдѣляющемуся при кристаллизаціи эвтектики. И только когда весь маточный металлъ замерзнетъ, образовавъ знакомую уже механическую смѣсь изъ чередующихся пластинокъ эвтектики, температура вновь начнетъ падать. Въ этомъ отношеніи *GH* соотвѣтствуетъ участку *AB* кривой охлажденія на рис. 28D; *HI* представляетъ періодъ замерзанія избыточнаго вещества и соотвѣтствуетъ *BC*; точка *I* представляетъ замедленіе *CD*, періодъ замерзанія эвтектики. *IK* соотвѣтствуетъ участку *DE*. Горизонтальное положеніе линіи *aBc* указываетъ на то, что ординаты участка *BD* равны между собой, т. е. каково бы ни было первоначальное процентное содержаніе свинца и олова въ сплавѣ, эвтектика замерзаетъ при одной и той же температурѣ.

дальнѣйшаго хода замерзанія температура и составъ маточнаго металла выражаются точками на кривой AB.

Другими словами, температура и составъ маточнаго металла скользятъ вдоль линіи AB отъ H до B.

Итакъ, линіи AB и BC имѣютъ двоякое значеніе. При перемѣнномъ первоначальнымъ составѣ онѣ выражаютъ температуры, при которыхъ начинается замерзаніе; тогда какъ при опредѣленномъ первоначальномъ составѣ онѣ выражаютъ температуру и составъ маточнаго металла во время избирательнаго замерзанія.

43) Продолженіе V-образныхъ кривыхъ далѣе ихъ точки пересѣченія. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ вѣтви AB и CB кривой



Рис. 25. Кривая замерзанія сплавовъ свинца съ оловомъ.
Roberts-Austen, «Proc. Royal Soc.», LXIII, стр. 452.

замерзанія были прослѣжены далѣе ихъ точки пересѣченія, какъ показано на рис. 25. Эти наблюденія были сдѣланы независимо Le Chatelier [1]), Dahms [2]) и Roberts-Austen [3]). Рис. 26 даетъ кривую охлажденія сплава 64% олова съ 36% свинца. На рис. 25 она представлена точками a, b и c, при чемъ обозначенія на обоихъ рисункахъ согласованы между собой.

Это явленіе можно отнести на счетъ переохлажденія. Вѣроятность переохлажденія основывается на приведенныхъ уже въ

---

[1]) Le Chatelier, «Comptes Rendus», 9 апрѣля, 1894.

[2]) Dahms, «Ann. Phys. Chem.» LIV, стр. 386, 1895.

[3]) Roberts-Austen, «Proc. Royal Soc.» LXIII. стр. 452, 1898.

§ 30 соображаніяхъ. Не требуетъ также поясненія, что точка d, при которой переохлажденіе останавливается, не находится въ связи съ кривыми замерзанія; она является совершенно произвольной температурной точкой. Далѣе, совершенно естественно, что разъ переохлажденіе останавливается и начинается замерзаніе, температура, вслѣдствіе выдѣленія тепла, поднимается до точки замерзанія эвтектики, bf. Но почему это запаздываніе c расположено на продолженіи линіи AB, т. е. почему оно стоитъ въ такомъ отношеніи къ нормальной кривой замерзанія, и почему возможно прослѣдить эти вѣтви V-образной кривой далѣе ихъ точки пересѣченія?

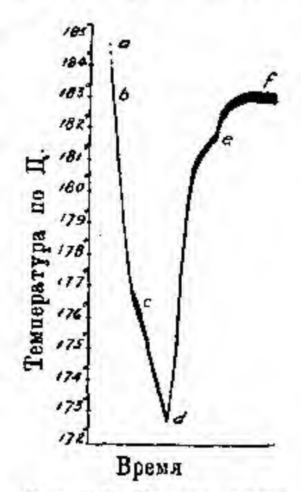


Рис. 26. Кривая охлажденія сплава свинца съ оловомъ; олова 64%, свинца 36%.

Roberts-Austen, «Proc. Royal Soc.», LXIII, табл. 9.

При объясненіи такого рода явленій необходимо быть осторожнымъ. Въ дальнѣйшемъ сдѣлана попытка слѣдующаго объясненія.

Положимъ, что въ расплавленномъ состояніи растворъ олова въ свинцѣ совершенно отличенъ отъ раствора свинца въ оловѣ. Бросается въ глаза тотъ фактъ, что кривая замерзанія перваго, AB, вмѣсто того чтобы служить продолженіемъ кривой замерзанія второго, CB, вмѣсто того, чтобы соединяться съ CB при помощи плавной кривой, пересѣкаетъ CB подъ острымъ угломъ, какъ будто бы AB и CB относились къ различнымъ тѣламъ.

Положимъ, что оба жидкіе сплава взаимно растворимы, причемъ каждый изъ нихъ сохраняетъ, по крайней мѣрѣ потенціально, свою индивидуальность, хотя вслѣдствіе взаимной растворимости ихъ нельзя въ отдѣльности ни обнаружить, ни различить какимъ бы то ни было путемъ. Положимъ, что въ настоящемъ случаѣ жидкій сплавъ, 64% олова съ 36% свинца, состоитъ изъ двухъ различныхъ растворовъ, растворенныхъ взаимно одинъ въ другомъ:

Раствора 1, присутствующаго въ большомъ количествѣ и состоящаго изъ свинца, растворенного въ оловѣ, въ отношеніи 64% растворителя (олово) и 36% растворенного тѣла (свинецъ).

Раствора 2, присутствующаго въ небольшомъ количествѣ и состоящаго изъ олова, растворенпаго въ свинцѣ, въ отношенiи 36% растворителя (свинецъ) и 64% раствореннаго тѣла (олово).

Нормальная температура замерзанiя раствора 1 лежитъ при температурѣ *a*.

Нормальная температура замерзанiя раствора 2 лежитъ при температурѣ *c*, на непосредственномъ продолженiи линiи *AB*.

Положимъ, что при нормальномъ замерзанiи, безъ переохлажденiя, когда охлажденiе достигнетъ температуры *a*, и растворъ 1 начнетъ замерзать, растворъ 2 превратится въ растворъ 1 путемъ соприкосновенiя съ твердыми частичками раствора 1, на-подобiе того, какъ одно аллотропическое видоизмѣненiе переходитъ въ другое при соприкосновенiи съ кристалломъ послѣдняго. Отсюда слѣдуетъ, что при температурѣ *c* не будетъ запаздыванiя, если замерзанiе идетъ нормальнымъ путемъ, безъ переохлажденiя.

Положимъ, что переохлаждается только растворъ 1. Тогда при пониженiи температуры до *c*, точки замерзанiя раствора 2, послѣднiй замерзаетъ и вызываетъ запаздыванiе *c* на кривой охлажденiя. Незначительность этого запаздыванiя соотвѣтствуетъ небольшому количеству раствора 2.

Положимъ, что по какой бы то ни было причинѣ стремленiе къ переохлажденiю раствора 1 настолько велико, что онъ не замерзаетъ даже во время замерзанiя раствора 2.

Здѣсь, слѣдовательно, и кроется объясненiе того, что запаздыванiе *c* составляетъ продолженiе линiи *AB*. Къ этому и было направлено все предыдущее разсужденiе.

44) Иныя критическiя кривыя для температуры и состава.

Отклонимся теперь на минуту въ сторону. Мы видѣли, что кривая замерзанiя указываетъ на соотношенiе между составомъ сплава, взятымъ, какъ цѣлое, и положенiемъ указанныхъ двухъ критическихъ точекъ замерзанiя; но на той же дiаграммѣ, выражающей температуру и составъ, можно показать одновременно цѣлый рядъ другихъ критическихъ явленiй.

Такъ, въ § 98 мы увидимъ, какъ выражается зависимость между температурой и способностью къ растворенiю при помощи, обычно, такъ называемыхъ «критическихъ кривыхъ». Мы будемъ называть эти кривыя въ дальнѣйшемъ изложенiи «кривыми насыщенiя»

Въ § 114 будетъ указано, какъ выражается ходъ избирательнаго замерзанія при помощи кривыхъ, основанныхъ на температурѣ, и составъ замерзшей части сплава, при томъ допущеніи, что послѣдняя путемъ диффузіи достигаетъ однородности.

Наконецъ, въ § 121 будетъ указано, какъ выражается ходъ избирательнаго замерзанія при помощи кривыхъ, основанныхъ на температурѣ, и составъ слоевъ, возникающихъ во время замерзанія.

На основаніи этихъ кривыхъ можно очень легко сдѣлать еще и дальнѣйшіе выводы. Напримѣръ, кривая замерзанія указываетъ также на ходъ избирательнаго замерзанія, поскольку по-



Рис. 27. Кривая замерзанія раствора поваренной соли въ водѣ.
Guthrie, «Phil. Mag.», 5-я серія, I, стр. 359, 1876.

слѣднее выражается въ каждый данный моментъ составомъ расплавленнаго маточнаго металла; равнымъ образомъ, можно сдѣлать заключеніе и относительно строенія замерзшей массы, принявъ во вниманіе составъ всего сплава, какъ цѣлаго. Наконецъ, кривыя насыщенія также даютъ указаніе на зависимость между строеніемъ сплава, съ одной стороны, и его температурой и составомъ въ цѣломъ, съ другой.

Соединивъ двѣ или болѣе такихъ кривыхъ въ одну діаграмму, можно установить зависимость, существующую между различными критическими явленіями.

Резюмируя все вышесказанное, мы, слѣдовательно, имѣемъ:

1) Кривыя замерзанія.

2) Кривыя насыщенія.

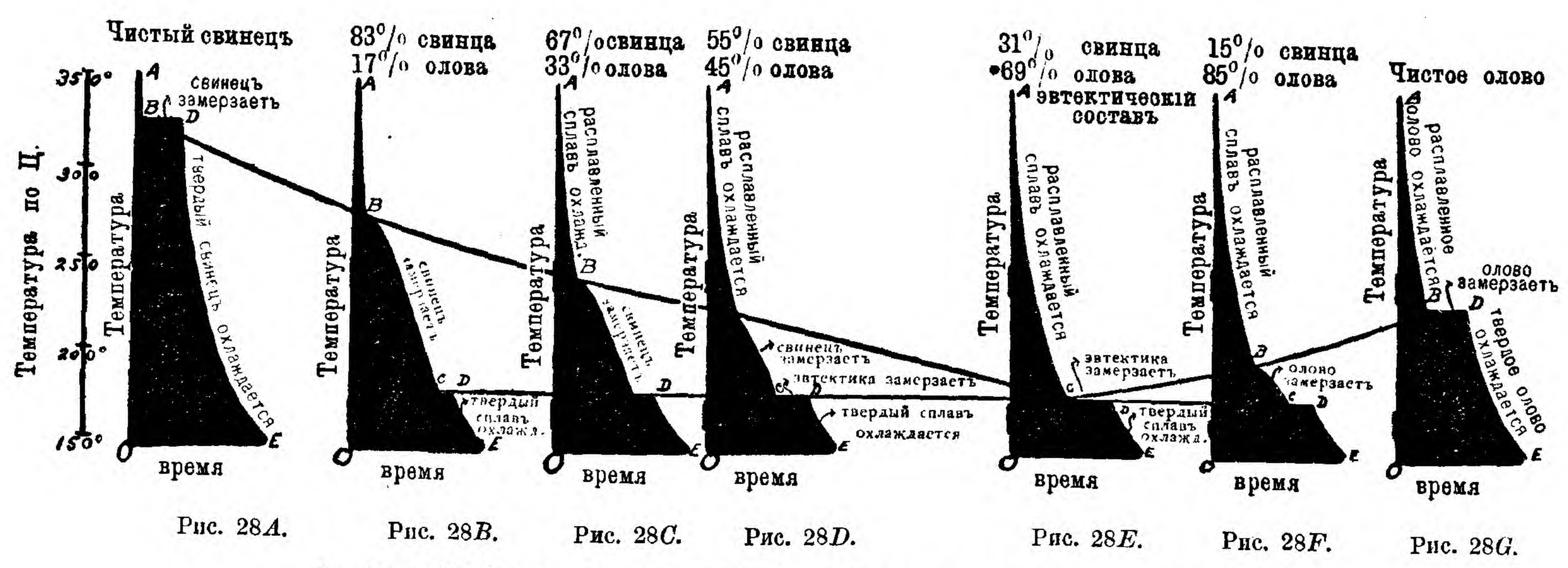


Рис. 28A. Рис. 28B. Рис. 28C. Рис. 28D. Рис. 28E. Рис. 28F. Рис. 28G.

Рис. 28A до 28H. Кривыя охлажденія и замерзанія сплавовъ свинца съ оловомъ, нанесенныя одновременно.

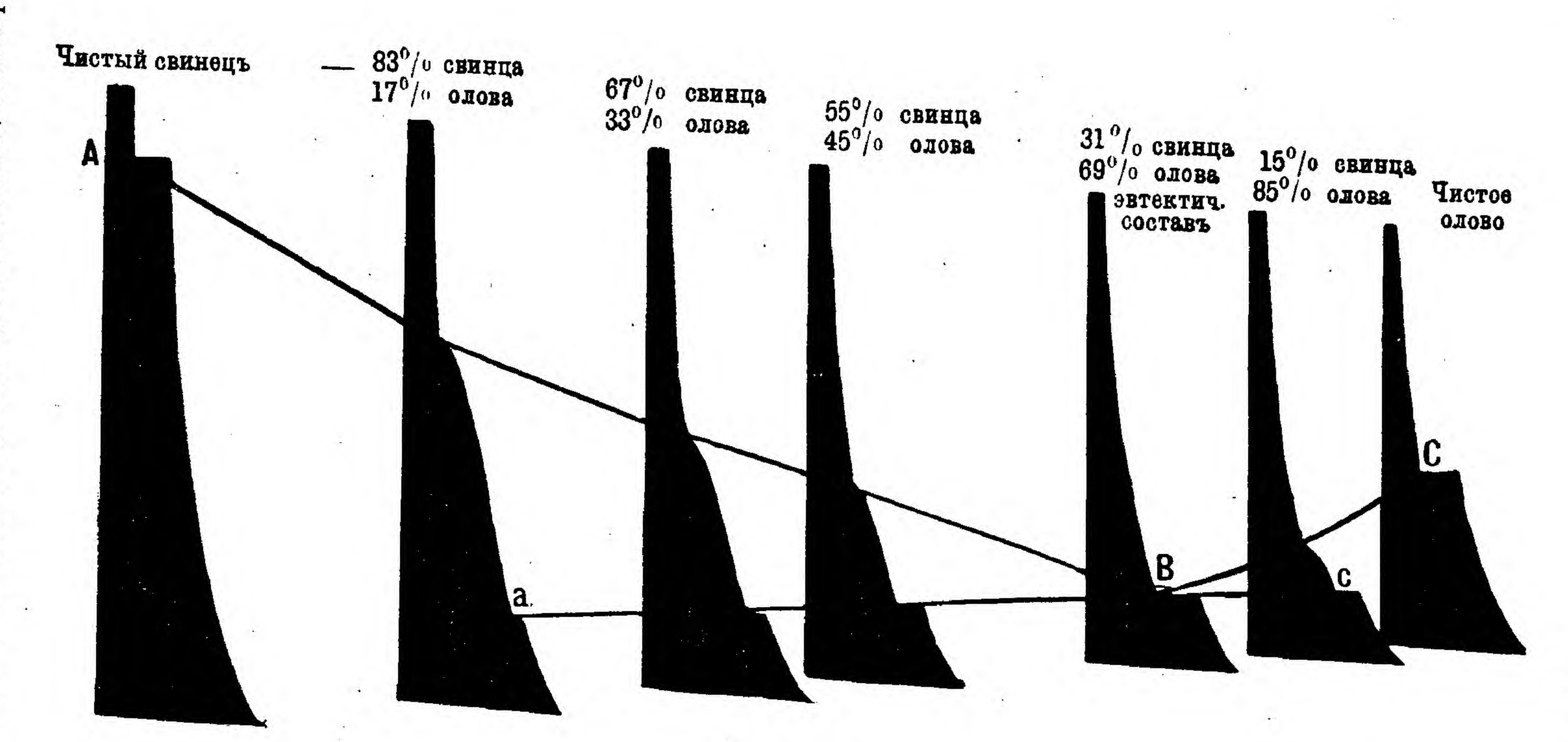

Чистый свинецъ
— 83°/o свинца
17°/o олова
67°/o свинца
33°/o олова
55°/o свинца
45°/o олова
31°/o свинца
69°/o олова
эвтектич. составъ
15°/o свинца
85°/o олова
Чистое олово
A
a
B
c
C

Рис. 28*H*.

3) Кривыя температуры и состава замерзшей части.

4) Кривыя температуры и состава замерзающихъ слоевъ.

Послѣ этого отступленія вернемся опять къ разсмотрѣнію первой группы кривыхъ—къ кривымъ замерзанія (рис. 27).

45) Кривыя замерзанія водныхъ растворовъ соли. Если мы соединимъ на рис. 27 точки замерзанія всѣхъ возможныхъ растворовъ соли въ водѣ, приведенныхъ на рис. 7—11, подобно тому, какъ мы это сдѣлали въ §§ 41 и 42 съ точками замерзанія сплавовъ олова съ свинцомъ, мы получимъ кривую замерзанія, имѣющую характерный видъ подчеркнутаго *V*. Вѣтвь *AB* представляетъ точки, при которыхъ начинаетъ вымерзать вода изъ растворовъ, содержащихъ избытокъ воды сверхъ эвтектической пропорціи 23,6%, другая вѣтвь, *BC*, представляетъ точки, при которыхъ начинаетъ вымерзать соль изъ растворовъ, содержавшихъ первоначально избытокъ соли сверхъ эвтектической пропорціи.

Горизонтальная линія *aBc*, подчеркивающая *V*, представляетъ замерзаніе эвтектики, состоящей изъ 23,6% соли и 76,4% льда. Мы видимъ, такимъ образомъ, полное соотвѣтствіе между явленіями замерзанія сплавовъ типа сплава свинца съ оловомъ и водныхъ растворовъ соли; оно выражается какъ въ видѣ и значеніи кривой замерзанія, такъ и въ строеніи замерзшей массы.

45) Соединеніе въ одну діаграмму кривыхъ охлажденія и кривыхъ замерзанія. Рис. 28 представляетъ собой попытку соединить въ одну діаграмму кривыя охлажденія и кривыя замерзанія серіи сплавовъ олова съ свинцомъ. Во-первыхъ, мы имѣемъ кривыя охлажденія для сплавовъ различнаго состава, рис. 28*A* до 28*G*, при чемъ кривыя расположены такимъ образомъ, что горизонтальное положеніе оси *OA* соотвѣтствуетъ процентному содержанію олова въ сплавѣ, къ которому кривая относится.

Проведемъ одну линію черезъ всѣ точки *B* и другую черезъ точки *C*. Положимъ, что кривыя охлажденія могутъ вращаться вокругъ оси *OA*; тогда если повернуть ихъ на 90° влѣво, они не будутъ уже лежать въ плоскости бумаги, какъ на рис. 28*A*—28*G*, но каждая кривая будетъ образовывать уголъ съ бумагой, какъ на рис. 28*H*. Соединительныя линіи изображаютъ, такимъ образомъ, кривую замерзанія *ABC* и *aBc* рисунка 24; въ то же время можно наблюдать и кривыя охлажденія.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

Строеніе бинарныхъ сплавовъ, не образующихъ опредѣленнаго химическаго соединенія.

47) Строеніе, котораго можно ожидать въ извѣстныхъ типичныхъ случаяхъ. Прежде всего посмотримъ, какого строенія можно ожидать въ нѣкоторыхъ типичныхъ случаяхъ. Оговоримся однако, что такого рода предположенія могутъ подвергнуться значительнымъ измѣненіямъ подъ вліяніемъ дальнѣйшихъ изслѣдованій. Въ настоящей главѣ, для упрощенія, мы разсмотримъ случай, когда два металла не образуютъ между собой опредѣленнаго химическаго соединенія, и постараемся выяснить, какъ будетъ измѣняться ихъ строеніе, если предположить, 1) что (въ твердомъ состояніи) они совершенно нерастворимы одинъ въ другомъ, 2) что они взаимно растворимы во всѣхъ отношеніяхъ, 3) что ихъ взаимная растворимость хотя и значительна, но ограничена. Конечно, при этомъ мы имѣемъ въ виду взаимную растворимость только въ твердомъ состояніи.

Въ послѣднемъ изъ этихъ трехъ случаевъ, при большомъ избыткѣ одного изъ металловъ, другой металлъ растворяется въ немъ совершенно. Но если количество обоихъ металловъ почти одинаково, тогда каждаго изъ нихъ можетъ быть больше, чѣмъ другой въ состояніи растворить.

48) Если металлы взаимно нерастворимы въ твердомъ состояніи, всѣ ихъ сплавы должны образовать эвтектику. Если предположить, что твердая соль во льду, а также твер-

дый свинецъ въ твердомъ оловѣ совершенно нерастворимы, тогда всѣ системы, образованныя изъ льда и соли, и всѣ твердые сплавы свинца съ оловомъ должны содержать эвтектику. Другими словами, если бы нерастворимость была абсолютной, тогда каждый водный растворъ соли и каждый сплавъ свинца съ оловомъ при замерзанiи должны были бы содержать большее или меньшее количество эвтектики, независимо отъ того, сколько соли первоначально содержалось въ растворѣ, или какъ бы ни было мало содержанiе свинца въ оловѣ или наоборотъ.

49) Почему эвтектика должна содержаться на всемъ протяженiи серiи. Во-первыхъ, потому, что избирательное замерзанiе происходитъ строгимъ, неизмѣннымъ образомъ; во-вторыхъ, потому, что такое избирательное замерзанiе должно вести къ образованiю эвтектики.

Для того, чтобы уяснить себѣ, почему избирательное замерзанiе должно идти строгимъ, неизмѣннымъ образомъ, обратимся къ объясненiю, данному въ § 21, относительно избирательнаго замерзанiя водныхъ растворовъ соли и приложимъ его къ замерзанiю сплавовъ свинца съ оловомъ.

Принявъ полную взаимную нерастворимость металловъ, совершенно невозможно представить себѣ, чтобы избирательнее замерзанiе могло идти съ нѣкоторыми отклоненiями. Избирательное замерзанiе должно идти строгимъ, неизмѣннымъ образомъ, безъ всякихъ отклоненiй. Ибо, въ противномъ случаѣ, напримѣръ, при замерзанiи сплава свинца съ малымъ количествомъ олова, слѣдовало бы допустить, что можетъ образоваться, положимъ, небольшой слой не чистаго свинца, но свинца, содержащаго олово. Въ силу полной взаимной нерастворимости свинца и олова, въ такомъ слоѣ оба эти металла должны были бы находиться въ видѣ отдѣльныхъ кристалловъ. Но кристаллы олова должны были бы необходимо вновь раствориться въ маточномъ металлѣ, по той простой причинѣ, что послѣднiй, благодаря этому, получилъ бы возможность оставаться жидкимъ при существующей температурѣ. Условiя же для растворенiя олова самыя благопрiятныя, такъ какъ уже въ самый моментъ образованiя кристаллы олова находились бы въ тѣсномъ соприкосновенiи съ расплавленнымъ маточнымъ металломъ, и, конечно, растворенiе ихъ произошло бы цацѣло. Такимъ образомъ, возможно только выпаденiе чистаго свинца, а слѣдовательно изби-

рательное замерзаніе должно идти необходимо безъ всякихъ отклоненій.

Положимъ, что и дальше вымерзаетъ только чистый свинецъ, маточный же металлъ, благодаря этому, обогащается оловомъ. Если бы этотъ процессъ шелъ до конца, тогда весь свинецъ долженъ былъ бы выпасть, въ расплавленномъ же состояніи осталось бы только чистое олово, въ какомъ бы маломъ количествѣ оно ни находилось первоначально. Но, какъ уже было показано въ § 29, избирательное замерзаніе должно кончиться, когда маточный металлъ, путемъ постепеннаго обогащенія оловомъ, достигнетъ эвтектическаго состава. Разъ достигнутъ эвтектическій составъ, избирательное замерзаніе должно окончиться, потому что этимъ путемъ уже болѣе не можетъ получиться маточный металлъ съ болѣе низкой точкой замерзанія. По этой причинѣ, когда маточный металлъ достигаетъ эвтектическаго, т. е. обладающаго наинизшей точкой замерзанія, состава, а одновременно и пониженіе температуры доходитъ до точки замерзанія эвтектики и стремится идти еще дальше, маточный растворъ начинаетъ замерзать уже не избирательнымъ путемъ, а образуетъ эвтектику. Такимъ образомъ, строгій ходъ избирательнаго замерзанія служитъ причиной тому, что маточный металлъ достигаетъ эвтектическаго состава, это же обстоятельство, въ свою очередь, вызываетъ образованіе эвтектики; при этомъ не играетъ роли, какъ бы ни было мало первоначальное содержаніе свинца, или, наоборотъ, олова. Словомъ, безразлично, каковъ бы ни былъ первоначальный составъ сплава.

50) Причина сложнаго строенія эвтектики. Причина сложнаго строенія эвтектики совершенно та же, что и въ случаѣ водныхъ растворовъ соли (§ 31). Разъ нами принята полная взаимная нерастворимость свинца и олова въ твердомъ состояніи, отсюда необходимо слѣдуетъ, что въ твердомъ состояніи они не должны содержать одинъ другого, и частички одного должны быть расположены отдѣльно отъ частичекъ другого.

51) Эвтектика рѣдко образуется на всемъ протяженіи серіи сплавовъ. Замѣтимъ, что тѣ серіи сплавовъ, которыя на первый взглядъ принадлежатъ къ первому типу, къ образующимъ эвтектику на всемъ протяженіи серіи, при ближайшемъ разсмотрѣніи могутъ оказаться принадлежащими къ третьему типу, то есть къ сплавамъ, образующимъ эвтектику только на извѣст-

номъ промежуткѣ серіи. Эвтектика можетъ наблюдаться на всемъ протяженіи серіи только у сплавовъ, въ составъ которыхъ входятъ взаимно абсолютно нерастворимые металлы. Сомнительно, чтобы такіе случаи могли часто наблюдаться. По всей вѣроятности, въ большинствѣ случаевъ существуетъ по крайней мѣрѣ очень незначительная взаимная растворимость, и эвтектика отсутствуетъ на короткомъ протяженіи по концамъ серіи. Типъ сплава, образующаго эвтектику на всемъ протяженіи серіи, можно разсматривать какъ предѣльный случай. Большинство случаевъ представляютъ собою только извѣстное къ нему приближеніе.

Мы сдѣлали допущеніе, что водный растворъ соли и сплавъ свинца съ оловомъ именно являются такими предѣльными случаями, для того чтобы было легче выяснить общій характеръ строенія сплавовъ [1]).

52) Если оба металла взаимно растворимы въ твердомъ состояніи, нѣкоторые или даже всѣ образуемые ими сплавы не должны содержать эвтектики. Какъ мы видѣли, при абсолютной взаимной нерастворимости въ твердомъ состояніи двухъ металловъ, всѣ ихъ сплавы должны состоять изъ 1) эвтектики и 2) избыточнаго металла, т. е. металла, находящагося въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи. Но дѣло будетъ обстоять совершенно иначе, если металлы взаимно растворимы въ твердомъ состояніи.

53) Шесть основныхъ чертъ, характеризующихъ происхожденіе и строеніе серій сплавовъ, совершенно не образующихъ эвтектики: Типъ сплавовъ золота съ серебромъ.

---

[1]) Такъ называемые сплавы желѣза съ углеродомъ даютъ примѣръ двухъ случаевъ, повидимому, полной нерастворимости. Первый изъ нихъ—это графитъ, избыточное вещество чугуна, содержащаго болѣе 4,3% углерода. Можно почти съ полной увѣренностью сказать, что графитъ не содержитъ желѣза (см. рис. 68. Сравни также Percy «Iron and Steel» стр. 511. Dr. Percy нашелъ, что графитъ содержитъ нѣкоторое количество кремнія, но его неудачныя попытки доказать присутствіе желѣза говорятъ за то, что послѣднее совершенно отсутствуетъ. См. также Bell «Principles of the Manufacture of Iron and Steel», стр. 156). Второй случай представляетъ собой желѣзо, выдѣляющееся въ видѣ феррита изъ аустенита въ медленно охлаждаемой стали при переходѣ черезъ критическій интервалъ. Повидимому, ферритъ совершенно не содержитъ углерода («Fifth Rept. Alloys Research Committee», стр. 50). Однако необходимо примѣнить еще болѣе точные методы изслѣдованія, чтобы установить полную взаимную нерастворимость даже и въ этихъ случаяхъ.

При взаимной растворимости двухъ металловъ во всѣхъ отношеніяхъ, замѣчается слѣдующее:

1) Замерзаніе идетъ избирательнымъ путемъ.

2) Но при этомъ вымерзающіе слои состоятъ не изъ чистаго избыточнаго металла или растворителя, безъ примѣси второго металла, а изъ сплава обоихъ металловъ, болѣе богатаго избыточнымъ металломъ, чѣмъ исходнная расплавленная масса. По мѣрѣ дальнѣйшаго хода замерзанія, маточный металлъ обогащается растворенным металломъ, при чемъ это обогащеніе не ограничено предѣломъ, какъ въ случаѣ сплава свинца съ оловомъ.

3) По мѣрѣ постепеннаго обогащенія маточнаго металла недостаточнымъ или растворенымъ металломъ, содержаніе послѣдняго въ вымерзающихъ слояхъ становится все больше и больше.

4) Одинъ изъ сплавовъ серіи, строго говоря, является эвтектическимъ,

5) но эвтектика не обладаетъ сложнымъ строеніемъ.

6) Всѣ остальные сплавы серіи не содержатъ эвтектики, если принимать подъ послѣдней эвтектику обычнаго типа, съ сложнымъ строеніемъ.

Изъ этихъ шести пунктовъ четвертый служитъ прямымъ слѣдствіемъ нашего опредѣленія эвтектики, остальные же естественно вытекаютъ изъ условій, какъ дальше вкратцѣ будетъ показано.

Причины возникновенія указаннаго строенія.

54) Замерзаніе идетъ избирательнымъ путемъ, но оно не строго выражено. Возвратимся къ вышеприведеннымъ двумъ первымъ пунктамъ и разсмотримъ случай сплава, состоящаго изъ 60% золота и 40% серебра; допустимъ при этомъ, что чистое серебро болѣе легкоплавко, чѣмъ который бы то ни было изъ его сплавовъ съ золотомъ, и что точка замерзанія непрерывно понижается съ возрастаніемъ процентнаго содержанія серебра отъ 0 до 100% (рис. 29).

Прежде всего, если замерзаніе пойдетъ избирательнымъ путемъ, то въ какомъ направленіи? Здѣсь необходимо разсматривать золото, какъ избыточный металлъ, потому что золото находится въ большемъ количествѣ, чѣмъ это соотвѣтствуетъ

эвтектической пропорціи, которая на самомъ дѣлѣ равняется— 100% серебра : 0 золота (См. § 56).

Вслѣдствіе этого, при избирательномъ замерзаніи, вымерзающіе слои должны содержать болѣе золота, избыточнаго металла, чѣмъ первоначальный маточный металлъ.

Затѣмъ, является вопросъ, должно ли замерзаніе идти именно избирательнымъ путемъ; припомнивъ, почему водные растворы замерзаютъ избирательнымъ путемъ (§ 21), мы увидимъ, что и въ данномъ случаѣ оно должно идти тѣмъ же путемъ. Но представимъ себѣ противное, т. е. что первая выдѣлившаяся крупинка будетъ состоять изъ золота и серебра въ отношеніи 60 : 40. Серебро будетъ стремиться раствориться въ маточномъ металлѣ, потому что растворъ, который путемъ его растворенія получится, будетъ содержать болѣе 40% серебра; слѣдовательно, какъ болѣе легкоплавкій, онъ будетъ въ состояніи оставаться въ жидкомъ состояніи при существующей температурѣ, которая соотвѣтствуетъ точкѣ замерзанія сплава, содержащаго 40% серебра и 60% золота. Ибо, увеличеніе содержанія серебра понижаетъ точку замерзанія сплавовъ золота съ серебромъ. Короче говоря, представленіе о неизбирательномъ замерзаніи совершенно неестественно.

Не слѣдуетъ, однако, думать, что замерзаніе должно непремѣнно идти строго избирательнымъ путемъ, т. е. что все серебро будетъ вновь растворяться въ маточномъ металлѣ, такъ что фактически будетъ вымерзать одно чистое золото. Этому явленію противодѣйствуетъ та сила, которая удерживаетъ вмѣстѣ металлы — растворитель и растворенное тѣло — въ выпавшемъ кристаллѣ.

Поэтому борьба между стремленіемъ серебра вновь расплавиться и перейти въ растворъ съ одной стороны и между сцѣпленіемъ, удерживающимъ металлы между собой въ кристаллѣ и препятствующимъ удаленію серебра изъ золота съ другой, кончаются компромиссомъ: часть серебра растворяется, часть остается въ твердомъ состояніи. Такимъ образомъ, хотя замерзаніе идетъ избирательнымъ путемъ, но съ извѣстнымъ отступленіемъ отъ строго-избирательнаго хода. Это именно и требовалось показать.

55) Неоднородность твердыхъ растворовъ. Говоря, что замерзаніе идетъ избирательнымъ путемъ, мы подразумѣваемъ, что по мѣрѣ хода замерзанія маточный металлъ обо-

гащается серебромъ. Не требуетъ особыхъ поясненій, что такое постепенное обогащеніе маточнаго металла сопровождается вымерзаніемъ слоевъ, содержащихъ все большее количество серебра.

Сказать, однако, что вымерзающіе слои послѣдовательно становятся все богаче серебромъ, все равно, что признать первоначальную неоднородность твердыхъ растворовъ. Конечно, диффузія стремится сгладить эту неоднородность. Въ § 86 будетъ указано, должна ли она сгладиться совершенно или нѣтъ.

56) Одинъ изъ членовъ серіи представляетъ собой эвтектику. Въ любой изъ такихъ серій долженъ быть одинъ сплавъ, обладающій болѣе низкой точкой замерзанія, чѣмъ всѣ осталь-

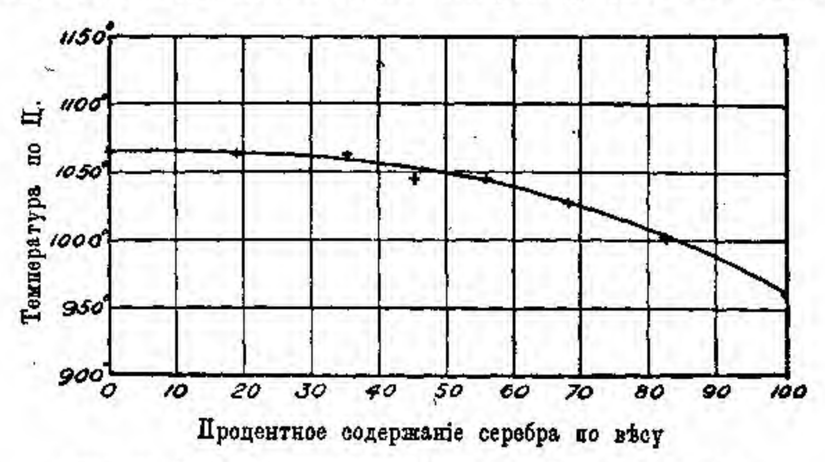


Рис. 29. Кривая замерзанія сплавовъ серебра съ золотомъ.

Построено по даннымъ Sir W. C. Roberts-Austen и T. K. Rose, «Proc. Royal Soc.», т. LXXI, стр. 162.

ные. Согласно опредѣленію Guthrie, этотъ сплавъ и будетъ эвтектическимъ. Въ виду того, что серебро болѣе легкоплавко, чѣмъ какой бы то ни было изъ его сплавовъ съ золотомъ, оно и будетъ представлять собой эвтектику въ ряду сплавовъ серебра съ золотомъ. Притомъ во всей серіи, при переходѣ отъ чистаго серебра къ чистому золоту, повышеніе точки замерзанія идетъ совершенно плавно, безъ скачковъ (рис. 29).

Въ серіи сплавовъ двухъ металловъ, взаимно растворимыхъ во всѣхъ отношеніяхъ при ихъ точкѣ замерзанія и даже ниже, возможно, однако, существованіе сплава болѣе легкоплавкаго, чѣмъ всѣ остальные сплавы, и даже чѣмъ сами составляющіе ихъ металлы; примѣромъ можетъ служить сплавъ іодистой ртути

съ бромистой ртутью (HgI_2 и $HgBr_2$, рис. 44). Такой сплавъ въ серіи былъ бы эвтектическимъ.

57) Простое строеніе такого рода эвтектики. Такая эвтектика представляла бы собой твердый растворъ, а не механическую смѣсь перемежающихся пластинокъ двухъ различныхъ веществъ, какъ въ случаѣ водныхъ растворовъ соли и сплава свинца съ оловомъ. Причина этого совершенно очевидна. Маточный растворъ соли и маточный металлъ, въ случаѣ сплава свинца съ оловомъ, замерзаютъ, достигнувъ эвтектическаго состава потому, что они одновременно достигаютъ и точки замерзанія эвтектики, самой низкой точки замерзанія во всей серіи. Замерзаніе въ этихъ случаяхъ не могло бы быть предотвращено дальнѣйшимъ обогащеніемъ маточнаго раствора и маточнаго металла, потому что такого рода обогащеніе вызвало бы только повышеніе точки замерзанія. Но причиной расщепленія эвтектики при замерзаніи на чередующіяся пластинки льда и соли, свинца и олова, служитъ совершенно иное обстоятельство—полная взаимная нерастворимость этихъ веществъ въ твердомъ состояніи. Это обстоятельство отсутствуетъ въ случаѣ сплавовъ типа сплавовъ золота съ серебромъ. Такъ какъ эти металлы взаимно растворимы въ твердомъ состояніи во всѣхъ отношеніяхъ, то и нѣтъ причины, почему бы могло произойти расщепленіе, каковъ бы ни былъ составъ эвтектики. Отсутствіе сложнаго строенія эвтектики у сплава, который можно признать въ серіи за эвтектическій, является, такимъ образомъ, естественнымъ слѣдствіемъ полной взаимной растворимости обоихъ металловъ.

58) Остальные сплавы въ серіи не образуютъ эвтектики. Изъ сказаннаго въ послѣднемъ параграфѣ слѣдуетъ, что сложная эвтектика не должна образовываться и въ остальныхъ сплавахъ серіи.

Повидимому, однако, не образуется даже и не сложная эвтектика, т. е. обогащеніе маточнаго металла идетъ не настолько быстро, чтобы могло образоваться нѣкоторое конечное количество маточнаго метанла съ низшей точкой замерзанія, иначе говоря, обладающаго эвтектическимъ составомъ. Требуются еще дальнѣйшія наблюденія, чтобы признать это положеніе за общій законъ, но вѣроятность послѣдняго очень велика. Полная взаимная нерастворимость двухъ металловъ обусловливаетъ строгое

избирательное замерзанiе и обогащенiе маточнаго металла до крайняго возможнаго предѣла. При неограниченной же взаимной растворимости двухъ металловъ, по мѣрѣ приближенiя маточнаго металла къ эвтектическому составу, замерзанiе будетъ идти все менѣе строго избирательнымъ путемъ; приближенiе къ эвтектической пропорцiи будетъ идти асимптотически.

Затѣмъ, если бы даже позже отложившiеся слои и имѣли составъ, близкiй къ эвтектическому, онъ долженъ былъ бы быть нарушенъ путемъ диффузiи въ ранѣе отложившiеся болѣе бѣдные слои.

59) Видъ кривой охлажденiя. Кривая охлажденiя этого класса сплавовъ должна имѣть видъ, подобный изображенному на рис. 30. Кривая ихъ похожа на кривыя сплавовъ, образующихъ эвтектику, и водныхъ растворовъ соли въ томъ отношенiи, что имѣетъ закругленную часть *BC* (отвѣчающую избирательному замерзанiю), но отличается отсутствiемъ горизонтальнаго участка *CD* (отвѣчающаго замерзанiю эвтектики).

60) При ограниченной взаимной растворимости двухъ металловъ въ твердомъ состоянiи, среднiе члены серiи ихъ сплавовъ должны образовать эвтектику и послѣдняя должна быть сложной. Олово въ твердомъ состоянiи растворяетъ значительное количество висмута, и наоборотъ, висмутъ — олова [1]). Такъ, при большомъ избыткѣ олова надъ висмутомъ, послѣднiй можетъ оставаться растворѳннымъ въ оловѣ даже послѣ замерзанiя всей массы. Наоборотъ, при большомъ избыткѣ висмута, олово можетъ оставаться растворѳннымъ въ висмутѣ при тѣхъ же условiяхъ. Существуетъ, однако, промежуточное положенiе, когда висмута находится больше, чѣмъ можетъ растворить олово, и въ то же время висмута недостаточно, чтобы онъ могъ растворить все присутствующее олово. При этихъ условiяхъ, сплавъ долженъ образовать эвтектику, и послѣдняя должна быть сложной. Причины этого ясны, собственно, изъ вышесказаннаго, но пояснимъ ихъ еще на реальномъ примѣрѣ.

Во-первыхъ тѣ же самыя причины, какъ и въ предыдущихъ случаяхъ (§§ 21, 49 и 54), обусловливаютъ избирательное замерзанiе (положимъ, сплава олова съ небольшимъ количествомъ висмута), прогрессивное обогащенiе маточнаго металла висму-

---

[1]) A. W. Kapp, «Ann. d. Physik», 4 серiя, т. VI, стр. 754—773. 1901.

томъ и постепенное вымерзаніе все болѣе и болѣе богатыхъ висмутомъ слоевъ. Каждый послѣдующій слой долженъ быть богаче висмутомъ, чѣмъ предыдущій, но въ то же время каждый слой долженъ содержать меньше висмута, чѣмъ маточный металлъ въ моментъ выдѣленія даннаго слоя. Теперь, если обогащеніе маточнаго металла будетъ настолько незначительно, что даже при замерзаніи послѣдней частички, содержаніе висмута въ немъ будетъ не больше, чѣмъ можетъ растворить олово въ твердомъ состояніи (скажемъ $N^0/_0$ висмута), тогда никакой сложной эвтектики не образуется. Обогащеніе маточнаго металла будетъ идти непрерывно. Не будетъ никакой причины, которая могла бы вызвать расщепленіе эвтектики даже при самомъ концѣ замерзанія. Такъ дѣло должно обстоять въ томъ случаѣ, если количество растворѳннаго висмута очень незначительно.

Положимъ, однако, что расплавленное олово первоначально будетъ содержать большее количество висмута; тогда значительное количество маточнаго металла будетъ еще оставаться въ жидкомъ состояніи къ тому времени, когда составъ вымерзающихъ слоевъ уже достигнетъ $N^0/_0$ висмута. До этого времени каждый вымерзающій слой содержалъ висмута больше, чѣмъ предыдущій, по той простой причинѣ, что вымерзаніе его шло изъ маточнаго раствора, болѣе богатаго висмутомъ, чѣмъ тотъ, изъ котораго вымерзалъ предыдущій. Другими словами, прогрессивное обогащеніе висмутомъ маточнаго раствора вело къ послѣдовательному отложенію слоевъ все съ большимъ содержаніемъ висмута. Это же послѣднее обстоятельство вызывало и медленный ходъ обогащенія маточнаго металла, по сравненію съ водными растворами соли и съ сплавами типа сплавовъ олова съ свинцомъ, у которыхъ мы принимаемъ полную взаимную нерастворимость ихъ компонентовъ въ твердомъ состояніи.

61) Подраздѣленіе періода вымерзанія избыточнаго вещества на двѣ части. Въ тотъ моментъ, когда вымерзающее олово достигнетъ предѣла насыщенія висмутомъ, должно прекратиться и дальнѣйшее обогащеніе слоевъ. Содержаніе висмута въ послѣдующихъ слояхъ будетъ $N^0/_0$. Прекращеніе дальнѣйшаго обогащенія слоевъ должно будетъ повести къ ускоренію въ обогащеніи маточнаго металла. Поэтому, періодъ вымерзанія избыточнаго вещества можетъ быть подраздѣленъ на двѣ части—

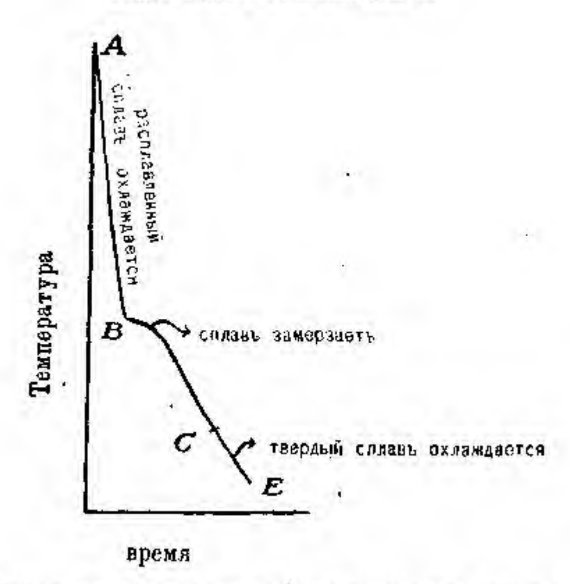


Рис. 30. Кривая охлажденія сплава, образующаго твердый растворъ.

первая соотвѣтствуетъ выдѣленію слоевъ, ненасыщенныхъ висмутомъ, вторая—насыщенныхъ (см. примѣчаніе къ § 124).

62) Видъ кривой охлажденія. Кривая охлажденія сплава олова съ висмутомъ, богатаго оловомъ, можетъ быть двухъ

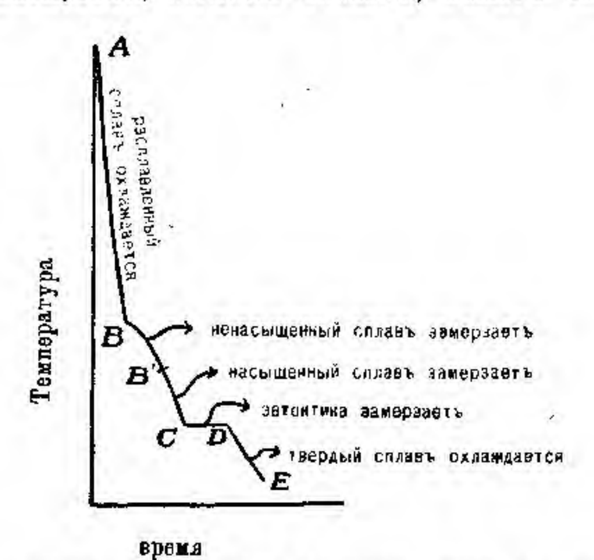


Рис. 31. Кривая охлажденія сплава, образующаго эвтектику; входящіе въ его составъ металлы обладаютъ ограниченной взаимной растворимостью.

AB—расплавленный сплавъ охлаждается.—*BB'*—вымерзающіе здѣсь слои ненасыщены.—*B'C*—вымерзающіе здѣсь слои насыщены. Точка насыщенія постепенно смѣщается.—*CD*—эвтектика замерзаетъ.—*DE*—твердый сплавъ охлаждается.

видовъ, какъ на рис. 30 или на рис. 31. Это зависитъ отъ того, достаточно ли велико содержанiе висмута въ сплавѣ, чтобы вымерзающiе слои олова могли достигнуть предѣла насыщенiя висмутомъ прежде, чѣмъ замерзнетъ весь маточный металлъ. На рис. 31 *BB'* отвѣчаетъ вымерзанiю избыточнаго вещества, олова, ненасыщеннаго висмутомъ, *B'C*—олова, насыщеннаго висмутомъ. Остается установить, нѣтъ ли перелома на кривой между *BB'* и *B'C*. Быть можетъ эта критическая точка не наблюдалась только потому, что ея не искали.

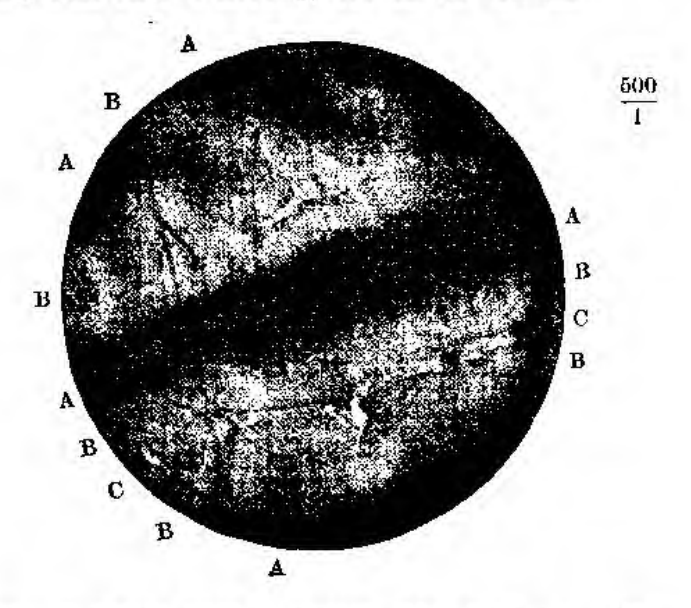


Рис. 32. Сплавъ мѣди съ оловомъ. Мѣди 90%, олова 10%.
Charpy, «Bull. Soc. d'Encouragement», 5-я серiя, II, 1897, стр. 406, рис. 27.
Также «The Metallographist», I, 1898, стр. 196, рис. 17.

63) Микроструктура. Микрофотографiя сплава мѣди съ оловомъ, приведенная на рис. 32, указываетъ, какова должна быть микроструктура, если замерзанiе идетъ такъ, какъ это изображено на рис. 31. Замѣтимъ, однако, что дѣйствительное строенiе даннаго сплава представляется спорнымъ. Но въ настоящее время, для нашихъ цѣлей, совершенно не важно пытаться установить дѣйствительное строенiе. Мы приводимъ эту фотографiю исключительно съ тою цѣлью, чтобы показать, какой видъ должна имѣть микроструктура сплава при описанномъ ходѣ замерзанiя; при этомъ мы допускаемъ, что данная структура могла также возникнуть и при иномъ ходѣ замерзанiя.

Видъ темныхъ пятенъ *AAA* говоритъ за то, что они образованы избыточнымъ металломъ въ періодѣ замерзанія *BB'* (рис. 31); болѣе свѣтлыя полосы *BBB*, повидимому, образованы насыщеннымъ сплавомъ, отложившимся въ періодѣ *B'C*; участки *CC* представляютъ собой, вѣроятно, эвтектику, возникшую въ періодѣ *CD*. Постепенный переходъ отъ *A* къ *B* (рис. 32) указывалъ бы въ такомъ случаѣ на постепенное измѣненіе состава слоевъ въ періодѣ замерзанія *BB'*.

64) Если замерзающіе слои достигаютъ точки насыщенія прежде, чѣмъ замерзнетъ весь маточный металлъ, должна образоваться эвтектика. Мы знакомы уже съ тѣмъ общимъ положеніемъ, что маточный металлъ въ каждый данный моментъ во время избирательнаго замерзанія болѣе богатъ растворемнымъ металломъ (въ настоящемъ случаѣ висмутомъ), чѣмъ вымерзающіе слои. Слѣдовательно, когда къ началу періода насыщенія содержаніе висмута въ этихъ слояхъ достигнетъ $N\%$, содержаніе висмута въ маточномъ металлѣ должно быть больше, скажемъ $(N+n)\%$.

Какъ обычно, замерзаніе должно идти до тѣхъ поръ, пока обогащеніе маточнаго металла висмутомъ не приведетъ къ эвтектической пропорціи. Продолжительность процесса замерзанія, пока не будетъ достигнуто эта пропорція, можетъ быть различной. Но какъ бы то ни было, ясно, что вымерзаніе слоевъ, содержащихъ $N\%$ висмута, совершенно не въ состояніи удалить изъ маточнаго металла избытокъ висмута въ $n\%$, который былъ при началѣ выдѣленія слоевъ съ $N\%$ висмута. При достиженіи эвтектической пропорціи маточный металлъ будетъ содержать по меньшей мѣрѣ $n\%$ висмута, какъ бы ни было велико количество вымерзшихъ слоевъ, содержащихъ $N\%$ послѣдняго. А такъ какъ при замерзаніи должно произойти расщепленіе маточнаго металла съ образованіемъ эвтектики (какъ и во всѣхъ предыдущихъ случаяхъ), то отсюда слѣдуетъ, что эвтектика должна образовываться при нормальныхъ условіяхъ во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда вымерзающіе слои достигаютъ точки насыщенія, прежде чѣмъ замерзнетъ весь маточный металлъ.

65) Эвтектика должна обладать сложнымъ строеніемъ. Эвтектика должна обладать сложнымъ строеніемъ въ силу тѣхъ же причинъ, какъ и въ случаѣ водныхъ растворовъ соли и спла-

вовъ свинца съ оловомъ (§§ 31 и 38). Мы видѣли, что обогащеніе вымерзающихъ слоевъ висмутомъ должно идти до насыщенія, т. е. до тѣхъ поръ, пока содержаніе висмута въ нихъ не достигнетъ $N^0/_0$.

При этомъ маточный металлъ будетъ содержать болѣе $N^0/_0$ висмута, и при дальнѣйшемъ замерзаніи, по мѣрѣ приближенія къ эвтектической пропорціи, содержаніе послѣдняго должно еще болѣе увеличиться. Короче говоря, эвтектическая пропорція соотвѣтствуетъ болѣе, чѣмъ $N^0/_0$ висмута. Но твердое олово можетъ содержать не больше $N^0/_0$ висмута (въ состояніи равновѣсія); слѣдовательно, при замерзаніи эвтектики, избытокъ висмута сверхъ $N^0/_0$ не можетъ оставаться растворенныымъ въ оловѣ и долженъ выдѣлиться (если равновѣсіе достигнуто). Эвтектика, такимъ образомъ, должна состоять изъ частичекъ олова, насыщеннаго висмутомъ, и изъ частичекъ висмута, насыщенныхъ (какъ будетъ указано въ §§ 69—74) оловомъ.

66) Часть кривой, отвѣчающая вымерзанію насыщенныхъ слоевъ. Только что было указано, что вымерзающіе въ періодѣ $B'C$ слои (рис. 31) состоятъ изъ олова, насыщеннаго висмутомъ. Для того чтобы убѣдиться, что явленіе это совершенно естественно, представимъ себѣ другой, единственно возможный случай, а именно, что слои состоятъ изъ отдѣльныхъ частичекъ олова, насыщенныхъ висмутомъ, и частичекъ висмута, чистаго или содержащаго олово. Очень легко представить себѣ возникновеніе смѣси твердыхъ частичекъ олова, насыщеннаго висмутомъ, и частичекъ висмута въ томъ случаѣ, если бы отлагающіеся слои содержали больше висмута, чѣмъ олово въ состояніи удержать въ растворѣ. Ибо, при затвердѣваніи мы имѣли бы дѣло съ явленіемъ пересыщенія; необходимымъ же слѣдствіемъ послѣдняго, было бы выдѣленіе избыточнаго висмута. При этомъ должна была бы образоваться 1) маленькая частичка олова, насыщеннаго висмутомъ ($N^0/_0$ висмута) и 2) очень небольшая частичка висмута (въ свою очередь насыщенная оловомъ, какъ мы скоро увидимъ). Ясно, однако, что при такомъ ходѣ явленія, частички висмута должны необходимо тотчасъ раствориться въ силу той же причины, какъ уже было указано на примѣрахъ водныхъ растворовъ соли и сплава свинца съ оловомъ (§§ 21 и 49). Растворенiе ихъ въ маточномъ металлѣ дало бы возможность послѣднему оставаться въ жидкомъ состояніи при существующей температурѣ.

Растворенію этихъ частичекъ не оказывала бы даже препятствія та сила, которая въ случаѣ сплава золота съ серебромъ (§ 54) препятствовала полному растворенію, потому что, въ настоящемъ случаѣ, даже полное раствореніе не помѣшало бы оставаться маточному раствору жидкимъ при существующей температурѣ, тогда какъ въ сплавахъ золота съ серебромъ полное раствореніе вызвало бы затвердѣніе маточнаго металла. Мы видѣли, въ случаѣ сплава серебра съ золотомъ, что существуетъ борьба между стремленіемъ серебра вновь раствориться

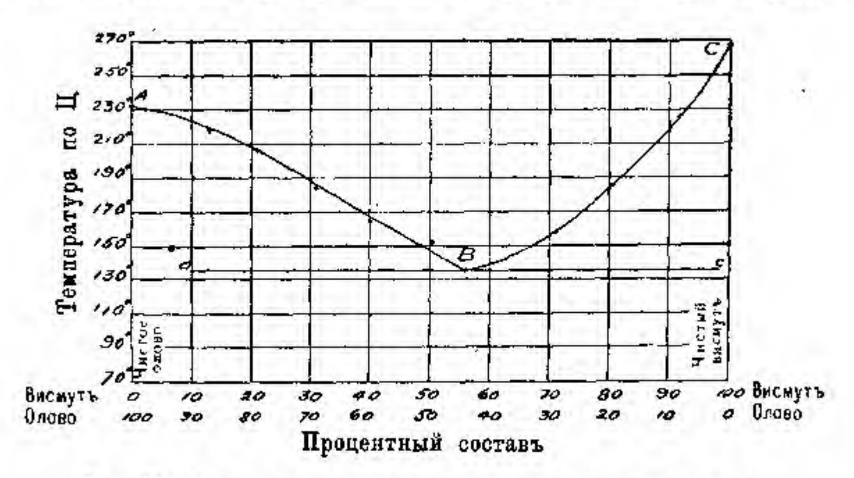


Рис. 33. Кривая замерзанія сплавовъ висмута съ оловомъ.

(A. W. Kapp, «Annalen der Physik», 4-я серія. VI, стр. 754—733, 1901).
Изъ ряда прямыхъ опытовъ, при которыхъ химически чистые висмутъ и олово сплавлялись въ различныхъ пропорціяхъ подъ слоемъ ціанистаго калія въ тигляхъ изъ магнезіи, мнѣ удалось установить, что граница эвтектической области лежитъ между 9,5 и 10% висмута со стороны олова и между 1 и 1,5% олова со стороны висмута. При большемъ процентномъ содержаніи въ томъ и въ другомъ случаѣ подъ микроскопомъ можно было видѣть небольшое количество эвтектики, при меньшемъ же, эвтектика отсутствовала. Для проявленія строенія служило травленіе разбавленной азотной кислотой. Сплавы были изготовлены и обработаны Irving C. Bull'емъ. Границы, приводимыя на рис. 33, были найдены указаннымъ образомъ, а не даны Kapp'омъ. Результаты по существу совпадаютъ съ неопубликованными данными William Campbell'я.

въ жидкомъ маточномъ металлѣ съ одной стороны и тою силою, которая сдерживаетъ золото съ серебромъ въ твердыхъ частичкахъ, съ другой. Мы видѣли также, что борьба эта кончается компромиссомъ, часть серебра растворяется, часть остается въ твердомъ состояніи. Но въ настоящемъ случаѣ раствореніе всего выпавшаго висмута, содержащаго олово, не сдѣлало бы невозможнымъ существованіе маточнаго металла въ жидкомъ состояніи при существующей температурѣ; поэтому весь висмутъ, содержащій олово, можетъ раствориться нацѣло,

не встрѣчая сопротивленія со стороны той слабой силы, которая удерживаетъ между собой висмутъ съ оловомъ.

67) Кривая замерзанія такихъ сплавовъ. Типомъ кривой замерзанія сплавовъ, образованныхъ металлами съ ограниченной взаимной растворимостью, можетъ служить кривая, изображенная на рис. 33. Здѣсь, такъ же, какъ на рис. 24, мы видимъ V-образныя вѣтви и подчеркивающую ихъ горизонтальную или эвтектическую линію. Значеніе ихъ то же, какъ и раньше. Однако, тотъ фактъ, что при незначительномъ количествѣ растворенцаго металла, т. е. при большомъ избыткѣ избыточнаго металла, не образуется эвтектика, находитъ свое отраженіе въ діаграммѣ—линія *aBc* не простирается во всю ея длину. Средніе члены серіи образуютъ эвтектику, крайніе же нѣтъ.

68) Границы эвтектической области. Ординаты, проходящія черезъ *a* и *c* представляютъ собой границы эвтектической области. Любой сплавъ висмута съ оловомъ, содержащій менѣе a% висмута, будетъ при полномъ затвердѣваніи твердымъ растворомъ висмута въ оловѣ; содержащій болѣе c% висмута будетъ твердымъ растворомъ олова въ висмутѣ. Всѣ же сплавы, содержащіе отъ *a* до c% висмута, будутъ обладать эвтектикой. При содержаніи висмута отъ *a* до B%, т. е. если олово является растворителемъ или избыточнымъ металломъ, а висмутъ растворeннымъ металломъ, сплавъ будетъ представлять собой механическую смѣсь, состоящую, во-первыхъ, изъ твердаго раствора висмута въ оловѣ, образовавшагося при замерзаніи избыточнаго металла, во-вторыхъ, изъ эвтектики. Если сплавъ содержитъ отъ *B* до c% висмута, онъ будетъ представлять собой механическую смѣсь изъ твердаго раствора олова въ висмутѣ и изъ эвтектики.

69) Значеніе и общія условія равновѣсія. Дальнѣйшее наше изслѣдованіе должно быть направлено къ изученію природы обѣихъ составляющихъ эвтектики. При этомъ мы будемъ придерживаться примѣра олова, содержащаго висмутъ. Въ § 65 мы имѣли уже основаніе предположить, что частички олова въ эвтектикѣ должны быть насыщены висмутомъ. Является вопросъ, должны ли сопровождающіе ихъ частички висмута быть насыщены оловомъ, или нѣтъ. Но, прежде чѣмъ попытаться дать отвѣтъ на этотъ вопросъ, будетъ полезно остановиться на общихъ условіяхъ равновѣсія въ подобныхъ случаяхъ.

Что мы понимаемъ подъ равновѣсіемъ? Прежде всего подъ равновѣсіемъ мы подразумѣваемъ, что ни одинъ металлъ не пересыщенъ другимъ, ибо до тѣхъ поръ, пока пересыщеніе существуетъ, пересыщенный металлъ стремится освободиться отъ избытка растворенннаго въ немъ металла. До тѣхъ поръ, пока это стремленіе остается неудовлетвореннымъ, равновѣсія не существуетъ. Подъ равновѣсіемъ, въ этомъ смыслѣ, разумѣется отсутствіе или полное исчезновеніе такого стремленія. Во-вторыхъ, подъ равновѣсіемъ мы подразумѣваемъ, что отсутствуетъ стремленіе къ диффузіи. Если мы нальемъ слой вина на слой воды, каждый изъ нихъ будетъ стремиться продиффундировать въ другой. Какъ соединяющіяся массы воды стремятся придти къ одному уровню, точно также вода и вино стремятся придти, путемъ диффузіи, къ одному составу, образовать однородную массу. Если въ какой-либо части смѣси вина больше, чѣмъ въ другой, избытокъ стремится распространиться въ мѣста съ меньшимъ содержаніемъ вина, совершенно подобно тому какъ стремится сгладиться волна. Замѣтимъ эту основную черту, характеризующую равновѣсіе. Какъ нельзя говорить о равновѣсіи до тѣхъ поръ, пока не произойдетъ сглаживанія волнъ, и вода не приметъ совершенно гладкой поверхности, точно также и въ случаѣ воды и вина равновѣсіе наступаетъ только тогда, когда исчезаетъ стремленіе къ диффузіи, т. е. пока вода и вино не образуютъ совершенно однородной жидкости. Равнымъ образомъ, если мы приведемъ въ соприкосновеніе чистое твердое золото и чистое твердое серебро, оба они будутъ стремиться продиффундировать другъ въ друга и образовать между собой твердый растворъ. При комнатной температурѣ это явленіе совершается очень медленно. Но по мѣрѣ повышенія температуры до точки плавленія, скорость диффузіи увеличивается. При изученіи свойствъ сплавовъ вблизи точки плавленія очень важно имѣть въ виду это стремленіе металловъ къ диффузіи. Диффузія является одной изъ причинъ, отъ которой зависитъ то или иное расположеніе металловъ въ твердыхъ сплавахъ, въ видѣ ли насыщенныхъ, ненасыщенныхъ или пересыщенныхъ растворовъ одного металла въ другомъ.

До тѣхъ поръ, пока остаются хотя бы слѣды такого стремленія къ диффузіи, равновѣсія не можетъ существовать. Равновѣсіе наступаетъ только съ полнымъ исчезновеніемъ этого

стремленія, когда золото и серебро образуютъ между собой совершенно однородный по всей массѣ твердый растворъ.

Подъ равновѣсіемъ, такимъ образомъ, мы разумѣемъ здѣсь полное отсутствіе неуравновѣшеннаго стремленія къ измѣненію путемъ диффузіи. Разсмотрѣнные нами только что случаи очень просты, вслѣдствіе того, что какъ вино и вода, такъ и золото и серебро взаимно неограниченно растворимы. Выяснивъ на этихъ примѣрахъ, что̀ мы разумѣемъ подъ равновѣсіемъ, дальнѣйшая наша задача будетъ состоять въ томъ, чтобы указать соотвѣтствующія условія равновѣсія для двухъ металловъ какъ олово и висмутъ, взаимно растворимыхъ только въ извѣстныхъ предѣлахъ.

70) Равновѣсіе въ твердомъ бинарномъ сплавѣ при ограниченной взаимной растворимости составляющихъ его металловъ. Общія положенія.

Положимъ, что въ дальнѣйшемъ мы будемъ имѣть дѣло съ двумя металлами *A* и *B*, взаимная растворимость которыхъ при данной температурѣ составляетъ 25%. При этихъ условіяхъ строеніе любой части сплава этихъ двухъ металловъ, если она только однородна, при какомъ бы то ни было возможномъ составѣ, будетъ слѣдующее.

Таблица 1.

№	Металлъ *A* %	Металлъ *B* %	Строеніе.
.	0 до 24,9	100 до 75,1	Ненасыщенный раств. *A* въ *B*
2.	25	75	Насыщенный растворъ *A* въ *B*
3.	25,1 до 74,9	74,9 до 25,1	Опредѣлить строеніе составляетъ цѣль настоящаго изслѣдованія.
4.	75	25	Насыщенный растворъ *B* въ *A*
5.	75,1 до 100	24,9 до 0	Ненасыщенный растворъ *B* въ *A*

Положимъ далѣе, что молекулярный вѣсъ этихъ металловъ одинаковъ. Разсмотримъ сначала въ § 71 тотъ случай (1 и 2 въ таблицѣ 1), когда металлъ *B* находится въ достаточномъ количествѣ въ сплавѣ, чтобы быть въ состояніи растворить все количество присутствующаго металла *A*, при томъ только

условіи, что металлъ *B* можетъ для этого придти въ достаточное соприкосновеніе съ металломъ *A*. Иначе говоря, сплавъ содержитъ не болѣе 25% металла *A*, а слѣдовательно не менѣе, чѣмъ 75% металла *B*.

Очевидно, что все сказанное по отношенію къ этому сплаву будетъ справедливо также и по отношенію къ сплаву, содержащему не болѣе 25% металла *B* и не менѣе 75% металла *A* (4 и 5 въ таблицѣ 1).

Затѣмъ разсмотримъ въ § 72 случай 3 таблицы 1, когда металла *B* въ сплавѣ содержится болѣе, чѣмъ присутствующій металлъ *A* можетъ растворить, и въ то же время металла *A* больше, чѣмъ можетъ растворить металлъ *B*. Очевидно, въ этомъ случаѣ, какъ металлъ *A*, такъ и металлъ *B* будутъ входить въ составъ сплава въ количествѣ, превышающемъ 25%, т. е между 25% и 75%. Справедливое по отношенію къ какому-либо сплаву будетъ справедливо также и по отношенію ко всѣмъ остальнымъ сплавамъ, процентный составъ которыхъ колеблется въ указанныхъ границахъ.

71) Случаи 1 и 2. Металлъ B теоретически способенъ растворить все присутствующее количество металла A въ твердомъ состояніи. Условіемъ равновѣсія въ данномъ случаѣ будетъ полное взаимное раствореніе обоихъ металловъ, съ образованіемъ однороднаго твердаго раствора. Несмотря на очевидность этого положенія, оно будетъ далѣе пояснено на нѣсколькихъ примѣрахъ.

Во-первыхъ, мы не въ состояніи представить себѣ стремленія къ диффузіи, если металлы образуютъ такой однородный твердый растворъ, безразлично насыщенный или нѣтъ. Слѣдовательно, равновѣсіе существуетъ. Съ другой стороны, если бы они образовали неоднородный твердый растворъ, диффузія стала бы стремиться уничтожить эту неоднородность: избытокъ стремился бы диффундировать изъ слоевъ съ большей концентраціей въ слои съ меньшей концентраціей, все равно, какъ вода стремится образовать одинъ общій уровень. Въ этомъ случаѣ равновѣсія, конечно, не существуетъ. Оно можетъ быть достигнуто только тогда, когда вся масса сплава станетъ однородной, совершенно независимо отъ того, былъ первоначально неоднородный растворъ ненасыщеннымъ въ цѣломъ, или часть его была насыщена, другая же ненасыщена.

Справедливость послѣдняго положенія совершенно очевидна. Вѣдь, если въ ненасыщенный растворъ соли въ водѣ помѣстить кусокъ соли, послѣдній станетъ растворяться и диффундировать въ окружающій ненасыщенный растворъ. Ясно, также, что если помѣстить подъ слоемъ насыщеннаго воднаго раствора соли слой чистой воды, въ послѣдній станетъ диффундировать соль. Но разъ соль диффундируетъ въ чистую воду, она должна въ силу тѣхъ же причинъ диффундировать и въ ненасыщенный растворъ соли въ водѣ. Совершенно то же стремленіе къ диффузіи должно существовать и въ соприкосающихся частяхъ сплава двухъ металловъ, въ томъ случаѣ, когда одна часть насыщена, другая же ненасыщена. До тѣхъ же поръ, пока такое стремленіе существуетъ, равновѣсія не можетъ быть.

Необходимо, такимъ образомъ, твердо помнить, что ненасыщенный растворъ какого-либо металла *A* въ какомъ-либо металлѣ *B* не можетъ находиться въ равновѣсіи съ насыщеннымъ растворомъ того же металла *A* въ томъ же металлѣ *B*. Напримѣръ, насыщенный растворъ висмута въ оловѣ не можетъ нахоходиться въ равновѣсіи съ ненасыщеннымъ, потому что часть висмута насыщеннаго раствора стремилась бы диффундировать въ ненасыщенный.

72) Случай 3. Каждый изъ металловъ находится въ большемъ количествѣ, чѣмъ другой теоретически способенъ растворить. Условіемъ равновѣсія въ этомъ случаѣ является распаденіе сплава на механическую смѣсь отдѣльныхъ частицъ, изъ которыхъ однѣ представляютъ собой насыщенный растворъ металла *A* въ металлѣ *B*, другія—насыщенный растворъ *B* въ *A*. При томъ условіи, что взаимная растворимость этихъ металловъ одинакова, сплавъ, содержащій точно 50% каждаго металла, будетъ состоять изъ смѣси равныхъ частей 1) металла *A*, насыщеннаго металломъ *B*, и 2) металла *B*, насыщеннаго металломъ *A*.

Въ томъ же случаѣ, если сплавъ содержитъ крайне незначительный избытокъ металла *A* надъ тѣмъ количествомъ, которое въ состояніи растворить металлъ *B* (случай близкій къ случаю 2 табл. 1), количество *A*, насыщеннаго *B*, будетъ очень невелико, и механическая смѣсь будетъ главнымъ образомъ состоять изъ частичекъ *B*, насыщенныхъ *A*.

Для того, чтобы убѣдиться, что высказанное въ самомъ началѣ этого параграфа общее положеніе справедливо, предполо-

жимъ (§ 73), что металлы дѣйствительно распредѣляются въ сплавѣ такимъ образомъ, и посмотримъ, будетъ ли такое распредѣленіе стойкимъ, т. е. будетъ ли оно отвѣчать равновѣсію. Затѣмъ предположимъ, что они распредѣляются инымъ образомъ, и посмотримъ, будетъ ли и въ этомъ случаѣ соблюдено равновѣсіе.

Для большей простоты, положимъ въ дальнѣйшемъ, что оба металла входятъ въ составъ сплава въ количествѣ 50% и что, какъ и раньше, теоретически взаимная ихъ растворимость составляетъ 25%.

73) Если оба раствора насыщены, система находится въ равновѣсіи. Положимъ, для упрощенія, что мы имѣемъ дѣло съ чрезвычайно малымъ количествомъ сплава, всего съ 200 молекулами, изъ которыхъ 100 молекулъ металла *A* и 100 молекулъ металла *B*. При этомъ онѣ располагаются въ видѣ двухъ отдѣльныхъ массъ, изъ которыхъ каждая представляетъ собой насыщенный растворъ одного металла въ другомъ. Строеніе въ такомъ случаѣ должно быть слѣдующее:

Группировка 1.

	Масса 1.	Масса 2.
Процентное содержаніе *A*	75	25
» » *B*	25	75
	100	100

Въ массѣ 1 *A* служитъ растворителемъ, *B* растворенньмъ металломъ; въ массѣ 2 *B* растворитель, *A* растворенный металлъ. Очевидно, что даже хотя бы часть растворителя или избыточнаго металла не въ состояніи перейти изъ одной массы въ другую. Предположимъ, однако, обратное. Положимъ, что 5 молекулъ изъ массы 1 перешли въ массу 2. Послѣ этого составъ массы 1 былъ бы: $70 \times 100 \div (70+25) = 73{,}68\%$ *A* и $25 \times 100 \div (70+25) = 26{,}32\%$ *B*. Такой составъ не можетъ отвѣчать состоянію равновѣсія, потому что металлъ *A* былъ бы пересыщенъ металломъ *B* (въ § 70 было уже указано, что для насыщенія металла *A* достаточно 25% металла *B*). Въ то же самое время масса 2 была бы пересыщена металломъ *A*, потому что она содержала бы $30 \times 100 \div (30 + 75) = 28{,}57\%$ *A*. Такимъ образомъ, ни та, ни другая масса не находятся въ равновѣсіи.

Теперь предположимъ, что изъ массы 1 въ массу 2 перейдетъ не растворитель *A*, но растворенный металлъ *B*, и притомъ, равнымъ образомъ, въ числѣ 5 молекулъ. Въ этомъ случаѣ массы будутъ содержать:

Группировка 2.

	Масса 1.	Масса 2.
Проц. содержаніе *A* . .	$\frac{75 \times 100}{75+20} = 78{,}95$	$\frac{25 \times 100}{80+25} = 23{,}81$
» » *B* . .	$\frac{20 \times 100}{75+20} = 21{,}05$	$\frac{60 \times 100}{80+25} = 76{,}19$
	100,00	100,00

Какъ видно, масса 1 состоитъ изъ металла *A*, ненасыщеннаго металломъ *B*, масса же 2 изъ металла *B*, ненасыщеннаго металломъ *A*, потому что какъ та, такъ и другая содержатъ менѣе 25% — предѣла насыщенія — растворенннаго металла.

Если бы мы привели въ соприкосновеніе расплавленный чистый металлъ *A* и расплавленный чистый металлъ *B*, конечно, слѣдовало бы ожидать, что они будутъ диффундировать одинъ въ другой, и процессъ диффузіи продолжался бы до насыщенія. Теперь, каждая изъ массъ въ группировкѣ 2 состоитъ изъ даннаго металла, ненасыщеннаго другимъ; масса 1 состоитъ изъ *A*, ненасыщеннаго *B*, масса 2 изъ *B*, ненасыщеннаго *A*.

Въ силу указанныхъ причинъ, слѣдуетъ ожидать, что избытокъ металла *A* изъ массы 1 продиффундируетъ въ массу 2, и наоборотъ, избытокъ *B* изъ массы 2 въ массу 1. Это явленіе должно прекратиться только по достиженіи насыщенія, т. е. когда будетъ достигнута первоначальная группировка 1, при которой масса 1 содержитъ 75% *A* и 25% *B*, а масса 2—25% *A* и 75% *B*.

Однимъ словомъ, единственно возможнымъ соотношеніемъ металловъ какъ въ той, такъ и въ другой массѣ можетъ быть 75 : 25, во-первыхъ потому, что болѣе низкое соотношеніе ведетъ къ пересыщенію, во-вторыхъ же потому, что болѣе высокое соотношеніе должно повести къ диффузіи избытка растворителя изъ одной массы въ другую, и наоборотъ. А это должно опять привести къ соотношенію 75 : 25.

Не трудно было уяснить себѣ переходъ группировки 2 въ группировку 1 путемъ диффузіи. Этотъ процессъ представляетъ собою ничто иное, какъ взаимное насыщеніе двухъ металловъ, первоначально ненасыщенныхъ, при чемъ переносъ одновременно совершается въ обѣ стороны. Предположимъ, однако, что 100 молекулъ каждаго металла расположатся первоначально въ видѣ трехъ отдѣльныхъ массъ:

Группировка 3.

	Масса 1.		Масса 2.		Масса 3.	
	Число молекулъ.	%	Число молекулъ.	%	Число молекулъ.	%
Металлъ A .	90	75	10	25	0	0
Металлъ B .	30	25	30	75	40	100
		100		100		100

Такая группировка, очевидно, не можетъ отвѣчать состоянію равновѣсія. Масса 2 и масса 3 должны тотчасъ соединиться путемъ диффузіи, и должна получиться

Группировка 4.

	Масса 1.		Масса 2.	
	Число молекулъ.	%	Число молекулъ.	%
Металлъ A .	90	75	10	12,5
Металлъ B .	30	25	30+40=70	87,5

Нестойкость массъ 2 и 3 при взаимномъ соприкосновеніи въ группировкѣ 3 слѣдуетъ изъ общаго положенія, высказаннаго въ § 71. Именно, насыщенный и ненасыщенный растворы любого металла A въ другомъ металлѣ B не могутъ быть между собой въ равновѣсіи.

Когда мы въ дальнѣйшемъ изложеніи познакомимся съ правиломъ фазъ, мы увидимъ, что нестойкость группировки 3 представляетъ собою примѣръ общаго закона, что никакая система, состоящая изъ двухъ компонентовъ (въ данномъ случаѣ

двухъ химическихъ элементовъ) не можетъ быть въ равновѣсіи, (исключая одной опредѣленной температуры), если она образуетъ болѣе двухъ «фазъ», т. е. совершенно различныхъ по свойствамъ массъ; въ данномъ случаѣ это два различныхъ раствора и одинъ свободный элементъ.

Убѣдившись въ томъ, что группировка 3 не отвѣчаетъ равновѣсію и стремится перейти въ группировку 4, посмотримъ, отвѣчаетъ ли послѣдняя, въ свою очередь, состоянію равновѣсія.

Изъ 70 молекулъ металла *B* въ массѣ 2, только 30 насыщены 10 молекулами металла *A*; остальныя 40 молекулъ являются ненасыщенными. Уже тотъ фактъ, что способность къ растворенію металла *B* при группировкѣ 4 остается неудовлетворенной, указываетъ, что группировка 1 отличается большей устойчивостью, больше отвѣчаетъ условіямъ равновѣсія.

Группировка 1 представляетъ собой именно ту группировку, въ которую должна стремиться перейти группировка 4, или какая либо иная, путемъ диффузіи. Въ случаѣ группировки 4, 15 молекулъ металла *A* и 5 молекулъ металла *B* стремятся перейти изъ массы 1 въ массу 2 и такимъ образомъ образовать группировку 1, отвѣчающую условіямъ равновѣсія.

Слѣдовательно и группировка 4 не соотвѣтствуетъ равновѣсію и должна имѣть стремленіе перейти въ группировку 1.

Мы убѣдились, такимъ образомъ, что группировка 1, при которой наблюдается полное взаимное насыщеніе, въ то же время отвѣчаетъ и состоянію равновѣсія; при группировкахъ же 2, 3 и 4 равновѣсіе не достигается.

Все сказанное по отношенію къ группировкамъ 2, 3 и 4 должно быть справедливо и по отношенію ко всякой иной группировкѣ, кромѣ группировки 1.

Мы нашли, что взаимное насыщеніе обоихъ металловъ является условіемъ равновѣсія *для того особеннаго*, изученнаго нами случая, когда 1) каждый металлъ присутствуетъ въ количествѣ 100 молекулъ и 2) взаимная растворимость ихъ составляетъ 25%. Путемъ точно такихъ же разсужденій можно убѣдиться, что все сказанное вполнѣ приложимо и для всякаго иного случая.

Однимъ словомъ, если каждый металлъ присутствуетъ въ большемъ количествѣ, чѣмъ это требуется для насыщенія дру-

того, въ условіяхъ равновѣсія мы будемъ имѣть механическую смѣсь взаимно насыщенныхъ частичекъ обоихъ металловъ, или, иначе говоря, двухъ насыщенныхъ растворовъ. Очевидно, это относится какъ до жидкаго, такъ и до твердаго состоянія. Въ жидкомъ состояніи, конечно, равновѣсіе достигается скорѣе, благодаря большей подвижности молекулъ.

Такого рода механическая смѣсь двухъ сплавовъ, особенно жидкихъ, естественно стремится стать все менѣе тѣсной, по мѣрѣ того, какъ частички каждаго сплава сливаются во все большія массы. Дѣло можетъ даже дойти до того, что въ силу различнаго удѣльнаго вѣса образуются два слоя, при чемъ болѣе легкій сплавъ будетъ расположенъ надъ болѣе тяжелымъ. Замѣтимъ, что, говоря о механической смѣси, какъ о нормальномъ состояніи, обыкновенно имѣютъ въ виду и это явленіе разслоенія; хотя надо признать, что терминъ «смѣсь» представляется не особенно удачнымъ въ приложеніи къ двумъ отдѣльнымъ слоямъ. Два слоя представляются предѣльнымъ случаемъ, и при приложеніи къ нимъ термина «механическая смѣсь» дѣлается извѣстная натяжка; это совершенно то же, что говорить о математической точкѣ, какъ о кругѣ съ безконечно малымъ радіусомъ, или о прямой линіи, какъ о части дуги круга съ безконечно большимъ радіусомъ.

74) Составляющія эвтектики должны быть взаимно насыщены. Вернемся опять къ строенію эвтектики, образующейся при замерзаніи какого либо сплава олова съ висмутомъ, въ которомъ послѣдняго содержится достаточно, чтобы повести къ образованію эвтектики (§§ 64, 65).

Мы уже видѣли, что такого рода эвтектика должна состоять изъ пластинокъ олова, насыщеннаго висмутомъ, и изъ пластинокъ висмута.

Теперь намъ надлежитъ разрѣшить вопросъ, будетъ ли въ свою очередь висмутъ насыщенъ оловомъ. Онъ долженъ быть насыщенъ оловомъ, по той причинѣ, что данная эвтектика образуется въ сплавѣ, относящемся къ сплавамъ, содержащимъ каждаго металла больше, чѣмъ другой въ состояніи растворить (§§ 72 и 73). Мы видѣли уже, что этотъ сплавъ содержитъ висмута больше, чѣмъ олово въ состояніи растворить, а съ другой стороны мы можемъ предположить, что онъ содержитъ больше олова, чѣмъ въ состояніи растворить вис-

мутъ. Въ противномъ случаѣ не было бы никакой причины для такого расщепленія.

Если бы содержаніе висмута въ маточномъ металлѣ къ тому времени, какъ послѣдній достигаетъ эвтектическаго состава и точки замерзанія, было достаточно, чтобы послѣ замерзанія удержать въ растворѣ все олово, которое къ тому моменту въ маточномъ металлѣ находится, тогда эвтектика была бы ничѣмъ инымъ, какъ твердымъ растворомъ олова въ висмутѣ, и отсутствовалъ бы поводъ къ образованію механической смѣси.

Такимъ образомъ, частички каждаго металла должны быть насыщены другимъ, потому что эвтектика содержитъ каждаго металла больше, чѣмъ другой въ состояніи растворить въ твердомъ состояніи. Короче говоря, эвтектика образуетъ механическую смѣсь, состоящую изъ насыщенныхъ растворовъ двухъ металловъ. Такое положеніе должно отвѣчать условіямъ равновѣсія. Принимая же во вниманіе условія возникновенія эвтектики, надо ожидать, что данный случай будетъ очень близокъ къ состоянію равновѣсія. За это говоритъ, во-первыхъ, то, что въ расплавленномъ маточномъ металлѣ, во время замерзанія эвтектики, металлы, по всей вѣроятности, расположены съ абсолютной однородностью, молекула къ молекулѣ, во-вторыхъ же, что при переходѣ изъ жидкаго въ твердое состояніе, движеніе молекулъ должно совершаться очень легко въ силу незначительной вязкости металла. Повидимому, здѣсь мы имѣемъ на лицо всѣ условія для того, чтобы молекулы могли расположиться съ наибольшей устойчивостью, съ возможнымъ приближеніемъ къ условіямъ равновѣсія.

75) Строеніе, котораго можно ожидать на основаніи этихъ условій у сплава, образующаго эвтектику. Продолжимъ наше изученіе сплава олова съ висмутомъ. Для упрощенія, предположимъ, что слои, вымерзающіе изъ расплавленной массы, расположатся вдоль гладкихъ стѣнокъ сосуда или изложницы совершенно параллельно, подобно послѣдовательнымъ чешуямъ въ луковицѣ, съ тою только разницею, что они будутъ очень тонки; скажемъ, толщина ихъ будетъ приближаться къ размѣрамъ молекулы. Далѣе, не будемъ принимать во вниманіе разности ихъ въ удѣльномъ вѣсѣ и сжатія при охлажденіи. Положимъ, что сплавъ содержится въ изложницѣ, имѣющей видъ куба, и что скорость, съ которою идетъ охладеніе съ поверхности излож-

ницы, одинакова для всѣхъ шести сторонъ куба; слѣдовательно скорость замерзанія и отложенія твердаго металла одинакова для всѣхъ шести сторонъ. Назовемъ этотъ типъ замерзанія луковичнымъ.

При этомъ строеніе замерзшей болванки нашего сплава было бы подобно изображенному на рис. 34. Внѣшняя часть, обозначенная 1, представляетъ ненасыщенный растворъ висмута въ оловѣ, отложившійся въ періодъ выпаденія ненасыщенныхъ слоевъ во время *избирательнаго* замерзанія, и соотвѣтствуетъ

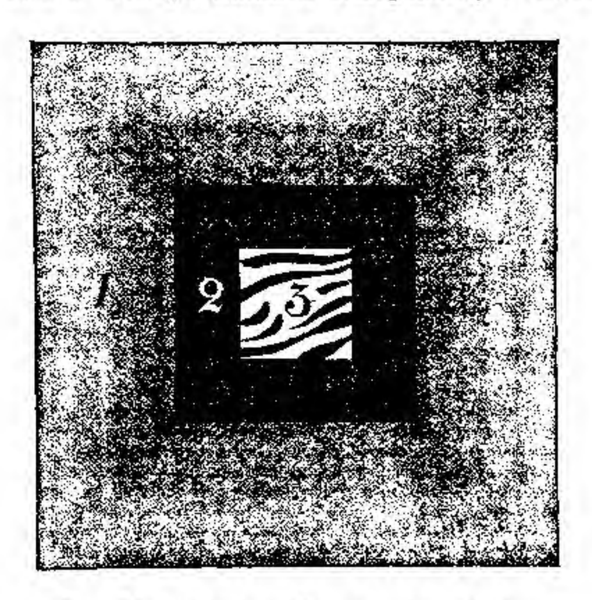


Рис. 34. «Луковичный» типъ замерзанія.

участку BB', рис. 31; часть 2 представляетъ насыщенный растворъ висмута въ оловѣ, отложившійся въ періодъ выпаденія насыщенныхъ слоевъ во время избирательнаго замерзанія, и соотвѣтствуетъ участку $B'C$, рис. 31; часть 3 представляетъ собой ту часть сплава, которая замерзаетъ послѣдней—эвтектику, и соотвѣтствуетъ участку CD, рис. 31.

76) Ликвація. Такого рода неоднородность затвердѣвшихъ сплавовъ извѣстна въ металлургической техникѣ подъ названіемъ ликваціи.

На рис. 35 показано неравномѣрное расположеніе углерода въ литой болванкѣ стали. Здѣсь ликвація наблюдается въ верхней части по оси болванки, потому что эта часть массы застываетъ

послѣдней. Вызывается это главнымъ образомъ 1) тѣмъ, что нижняя часть болванки приходитъ въ соприкосновеніе съ холоднымъ чугуннымъ дномъ изложницы, который сильно поглощаетъ тепло, тогда какъ верхняя часть болванки соприкасается съ воздухомъ, черезъ который тепло передается сравнительно слабо; 2) тѣмъ, что болѣе горячія части расплавленнаго металла, какъ болѣе легкія, поднимаются кверху, тогда какъ

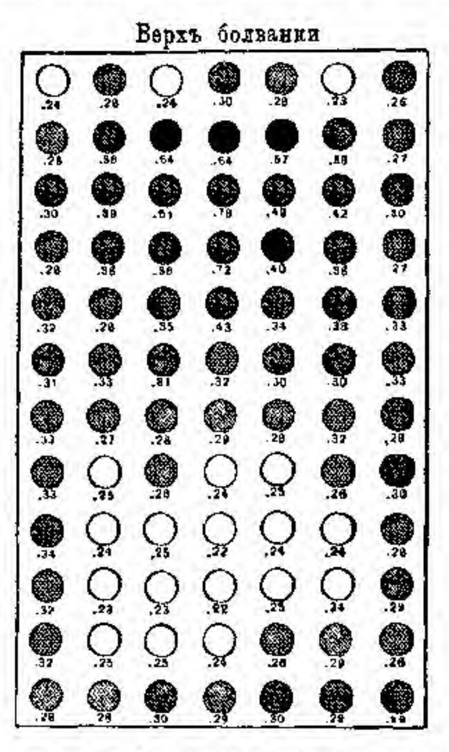


Рис. 35. Процентное содержаніе углерода въ различныхъ точкахъ по вертикальному разрѣзу въ большой болванкѣ.

Maitland «The Treatment of Gun-steel», выдержки изъ «Proc. Inst. Civ. Eng.», LXXXIX, стр. 12, 1887. Глубина окраски кружковъ приблизительно пропорціональна содержанію углерода.

болѣе холодныя, температура которыхъ близка къ температурѣ замерзанія, опускаются ко дну. Въ той же части, которая замерзаетъ послѣдней, гдѣ бы ни она находилась, слѣдуетъ ожидать и эвтектики, какъ наиболѣе легкоплавкой части всей массы. По той же самой причинѣ насыщенные слои (2, рис. 34) будутъ окружать эвтектику, независимо отъ того, находится ли она въ центрѣ массы или нѣтъ. Въ свою очередь, насыщенные слои окружены болѣе или менѣе симметрично по отношенію къ эвтектикѣ ненасыщенными слоями (1, рис. 34).

77) Ненормальная ликвація. Нормально, казалось бы, при ликваціи, масса выдѣлившаяся при застываніи болѣе раннихъ слоевъ и сосредоточившаяся въ верхнемъ концѣ болванки, должна была бы быть самой легкоплавкой изъ тѣхъ составляющихъ, которыя образуются при застываніи.

Въ то же время, процентное содержаніе раствореннаго металла или примѣси, если можно такъ выразиться, должно было бы быть въ ней больше, чѣмъ въ исходномъ жидкомъ сплавѣ, взятомъ въ цѣломъ. Однако, это не всегда справедливо. Такъ, въ болванкахъ серебра съ примѣсью мѣди ликвировавшая часть вмѣсто того, чтобы быть богаче мѣдью, чѣмъ ранѣе застывшія части, на самомъ дѣлѣ богаче серебромъ [1]).

Такимъ образомъ ликвировавшая часть, которая по своему положенію должна, казалось бы, замерзать послѣдней, на самомъ дѣлѣ, судя по составу, повидимому, обладаетъ болѣе низкой температурой плавленія, чѣмъ ранѣе ея застывшія части. Въ этомъ случаѣ, кажется, что части, замерзающія раньше, болѣе легкоплавки, чѣмъ замерзающія позже. То же самое наблюдается и у нѣкоторыхъ иныхъ сплавовъ.

Объясненіе, даваемое этому явленію, не совсѣмъ ясно. Конечно, могутъ играть роль конвекціонные токи и распредѣленіе по удѣльному вѣсу возникающихъ во время замерзанія твердыхъ составляющихъ. Но едва ли это само по себѣ служитъ достаточной причиной. Другое объясненіе нѣсколько сложнѣе, но въ то же время и болѣе убѣдительно. Принимается, что во время замерзанія ранѣе выпавшія частички являются менѣе легкоплавкими, чѣмъ выпавшія позднѣе, или, короче говоря, что отложеніе идетъ нормально; однако, послѣ замерзанія, при дальнѣйшемъ медленномъ охлажденіи, серебро переносится по направленію къ центру, сливаясь на-подобіе взвѣшенныхъ въ водѣ капель масла. Иначе говоря, послѣ замерзанія эвтектики на ряду съ частичками насыщеннаго раствора серебра въ мѣди должны находиться также частички раствора мѣди въ серебрѣ. Можно предположить, что отдѣльныя частички обоихъ растворовъ имѣютъ стремленіе передвигаться къ центру для того, чтобы одинаковыя частички могли слиться между собой. Однако оба рода частичекъ

---

[1]) W. Chandler Roberts (Roberts-Austen), «Proc. Roy. Soc.», 23, стр. 490, рис. 1 и 3, 1875.

не въ состоянiи передвигаться одновременно. Отсюда извѣстное соревнованiе между серебромъ и мѣдью. Возможно предположить, что въ этомъ соревнованiи первенство остается за серебромъ.

Для большей простоты, въ дальнѣйшемъ изложенiи мы не будемъ останавливаться на ненормальной ликвацiи, а сосредоточимъ наше вниманiе на ходѣ ликвацiи, который представляется намъ нормальнымъ.

78) Видоизмѣненiя этой структуры. При разсматриванiи сплавовъ подъ микроскопомъ, замѣчаются значительныя отсту-

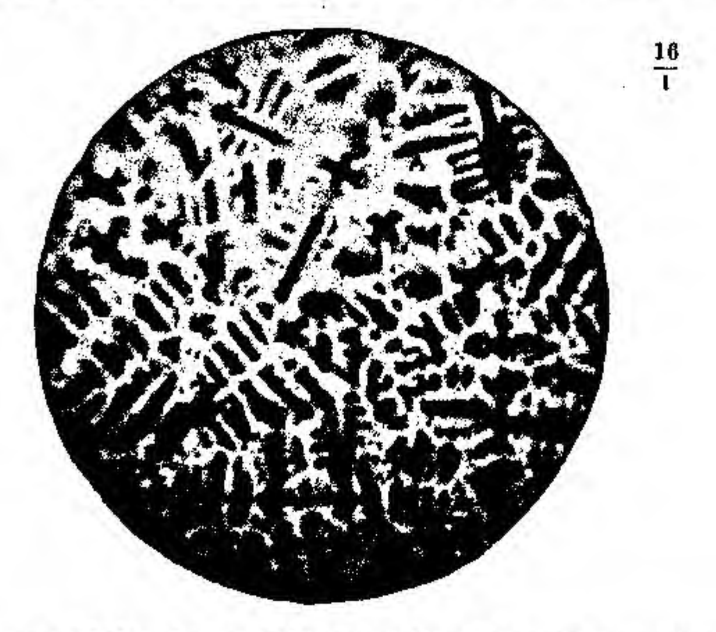


Рис. 36. Сплавъ 97,1% мѣди съ 2,9% алюминiя; здѣсь видна неоднородность твердаго раствора.

Wm. Compbell, частное сообщенiе.

пленiя отъ того общаго типа, который былъ представленъ на рис. 34 (рис. 17, 18, 19 и 36). Вмѣсто послѣдовательно отложившихся слоевъ, параллельныхъ стѣнкамъ изложницы или внѣшней поверхности массы сплава, наблюдаются образованiя, по виду напоминающiя собой мохъ или миніатюрныя елочки. Вымерзающiя части сплава отлагаются не въ видѣ слоевъ, а образуютъ какъ бы вѣтви. При этомъ, прежде чѣмъ замерзанiе совершенно окончится, часть расплавленной массы захватывается этими образованiями и изолируется отъ расплавленнаго металла. Форма отдѣльныхъ

елочекъ сильно мѣняется въ зависимости отъ состава сплава и, вѣроятно, отъ условій охлажденія Вѣтви могутъ быть очень развиты, какъ видно на рис. 42, или представлять собой только зачатки, какъ это можно видѣть на нижней части большого кристалла, изображеннаго на рис. 5. Отложеніе можетъ идти и инымъ путемъ, наприм. въ видѣ кубовъ (рис. 37), какъ въ случаѣ сплава олова съ сурьмой. При очень медленномъ охлажденіи ростъ отложеній можетъ идти вокругъ небольшихъ зародышей, которыя представляютъ собой или дѣйствительные островки, т. е. совершенно не связаны съ уже застывшей частью массы, или связь настолько слаба, что она легко порывается и они всплываютъ кверху (см. § 37). Во всякомъ случаѣ, конечнымъ результатомъ роста елочекъ должно быть поглощеніе ими всего металла и образованіе столбчатаго строенія, примѣромъ котораго можетъ служить рис. 3.

На рис. 38 представлена еще иная форма роста. Здѣсь тонкіе листочки, повидимому, карбида желѣза, Fe_3C, называемаго цементитомъ, пронизываютъ полость въ болванкѣ ферромарганца.

Пластинки эти могутъ достигать значительной величины, какъ указано на рис. 39. Въ этомъ случаѣ, большія грани куска ферромарганца, повидимому, образовались вслѣдствіе того, что при разбиваніи болванки, раскалываніе шло по пластинкамъ цементита, служившимъ здѣсь плоскостями спайности. На рис. 40 приведена микрофотографія образчика чугуна, содержащаго ясно выраженныя пластинки цементита.

Опредѣленія. Для того, чтобы облегчить дальнѣйшее изученіе явленій послѣдовательнаго вымерзанія, примемъ условно слѣдующіе термины.

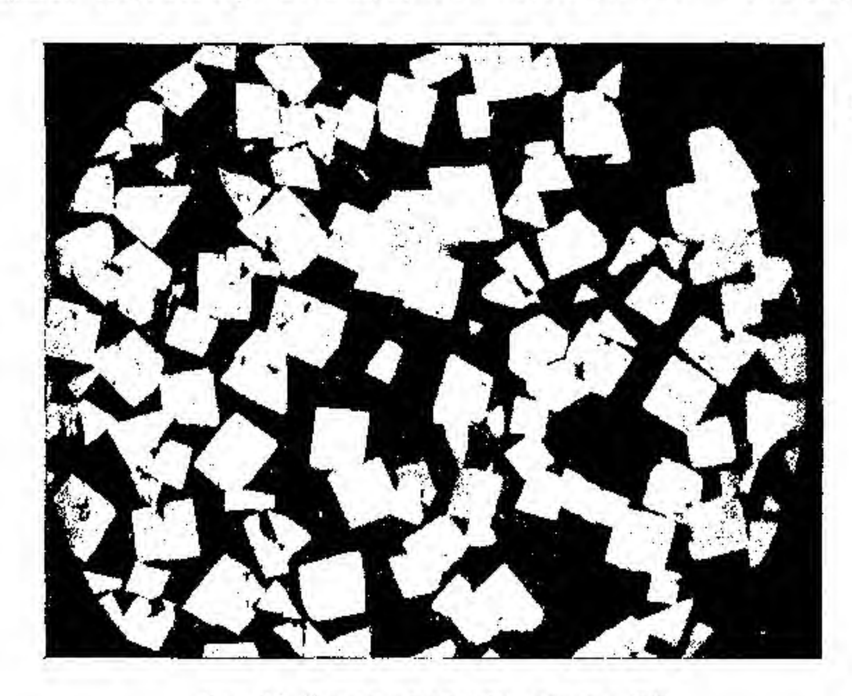
Подъ замерзшимъ материкомъ мы будемъ подразумѣвать ту часть сплава, которая въ данный моментъ уже находится въ твердомъ состояніи.

Подъ береговыми слоями будутъ подразумѣваться тѣ слои, которые уже отчасти замерзли, отчасти же еще пока нѣтъ, съ маленькими бассейнами еще расплавленной массы; иначе говоря, тѣ слои, процессъ замерзанія которыхъ продолжается.

Прибрежной полосой будетъ называться непосредственно примыкающая къ береговымъ слоямъ часть еще не замерзшаго сплава. Иными словами, та часть массы, которая еще не начала замерзать, но уже близка къ замерзанію.

Открытымъ моремъ мы будемъ называть не замерзшій маточный металлъ за прибрежной полосой. Рис. 42 можетъ помочь уясненію значенія этихъ терминовъ.

Теперь мы займемся дальнѣйшимъ изученіемъ отложеній, имѣющихъ видъ елочки, и сравнимъ ихъ съ тѣмъ типомъ отложеній, который мы назвали «луковичнымъ» (ср. рис. 34). Мы увидимъ, что, несмотря на кажущееся большое различіе этихъ двухъ



$\frac{33}{1}$

Рис. 37. Сплавъ, олова 80%, сурьмы 20%.

Антимонидъ олова, SnSb, выдѣлился въ видѣ кубовъ. Горизонтальный разрѣзъ болванки. Вертикальное освѣщеніе. Приготовленъ William Campbell'емъ въ лабораторіи автора.

типовъ отложеній, они обладаютъ двумя чертами, указывающими на то, что они имѣютъ много общаго. Во-первыхъ, хотя отложеніе и идетъ главнымъ образомъ вдоль извѣстныхъ отростковъ, однако оно происходитъ въ видѣ слоевъ. Во-вторыхъ, несмотря на то, что эти отростки захватываютъ часть жидкаго маточнаго металла, очень значительная часть послѣдняго остается свободный и обнаруживаетъ явленіе ликваціи.

79) Отложеніе происходитъ въ видѣ слоевъ, хотя и искаженныхъ. Разсматривая структуру, представленную на рис. 36, можно видѣть, что отложеніе идетъ преимущественно вдоль вѣт-



Рис. 38. Листки, повидимому, цементита, Fe_3C, въ ферромарганцѣ.
Коллекція автора.



Рис. 39. Кусокъ ферромарганца съ большими гранями, образованными листками цементита.
Коллекція автора.

вей и отростковъ въ видѣ послѣдовательныхъ слоевъ. Это видно на рис. 36 подъ буквою *A*, гдѣ ясно замѣтенъ очень постепенный переходъ оттѣнка. Здѣсь также, слѣдовательно, отлагаются слои, отличающіеся отъ слоевъ луковичнаго типа (рис. 34), только тѣмъ, что послѣдніе образуютъ ровныя концентрическія поверхности, тогда какъ слои, представленные на рис. 36, хотя и идутъ параллельно другъ другу, но въ то же время могутъ группами внезапно измѣнять направленіе, слѣдуя изгибамъ вѣтвей или располагаясь вокругъ ихъ концовъ. Расположеніе этихъ слоевъ можно сравнить со слоями горной породы, идущими



Рис. 40. Чугунъ; пластинки цементита и эвтектика.
Разрѣзъ, параллельный поверхности охлажденія.
Tiemann, лабораторія автора, «The Metallographist», VI, стр. 322.

хотя и параллельно, но образующими складки, или съ смятой брошюрой, разсматриваемой съ обрѣза.

Данное сравненіе можетъ навести на мысль, что отложеніе идетъ одинаково какъ вдоль иглъ и вѣтвей, такъ и сучьевъ елочекъ. Однако болѣе вѣроятно, что по нѣкоторымъ плоскостямъ отложеніе идетъ скорѣе, чѣмъ по другимъ, а именно, повидимому, сучья скорѣе утолщаются, чѣмъ вѣтви, а послѣднія утолщаются гораздо скорѣе, чѣмъ иглы. Повидимому, дѣло обстоитъ такимъ образомъ и на участкѣ, находящемся подъ буквою *A* на рис. 36, ибо измѣненіе оттѣнка идетъ очень постепенно кверху и книзу и не наблюдается вправо и влѣво. Кажется, какъ будто бы наростаніе шло только вверху и внизу, а не съ боковъ.

80) Замыкающій типъ замерзанія [1]. Разсуждая логически, мы должны были бы придти къ заключенію, что при отложеніи въ видѣ отростковъ вмѣсто концентрическихъ слоевъ, имѣющихъ видъ куба (рис. 34), кубическая масса расплавленнаго сплава должна была бы быть подѣлена отростками на маленькіе, совершенно изолированные кубы. Схематически это представлено на рис. 41; вся масса раздѣлена на 27 отдѣльныхъ кубиковъ, изъ которыхъ въ разрѣзѣ видно девять. Не слѣдуетъ думать, чтобы такое полное подраздѣленіе и изолированіе

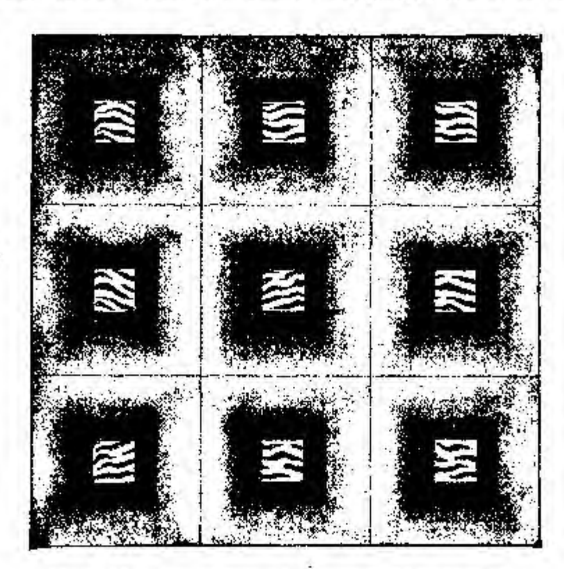


Рис. 41. «Замыкающій» типъ замерзанія.

могло произойти въ дѣйствительности въ самомъ начальномъ періодѣ замерзанія. Если оно и происходитъ, то позднѣе, когда отростки пріобрѣтаютъ способность путемъ постепеннаго утолщенія обхватить извѣстныя части массы, находящіяся еще въ жидкомъ состояніи. Отростки какъ бы изолируютъ извѣстные бассейны отъ той части жидкой массы, которую мы назвали открытымъ моремъ—открытымъ въ томъ смыслѣ, что внутри куба подъ его застывшей поверхностью оно простирается отъ одного застывшаго берега до другого. Мы называемъ его открытымъ несмотря на то, что подразумѣваемъ, что оно замерзало какъ съ верхней поверхности, такъ и со дна и съ боковъ.

---

[1] Въ оригиналѣ «Landlocking type of freezing».

Рисунокъ 41 представляетъ предѣльный случай, къ которому стремится описанный выше ходъ замерзанія. Для удобства мы будемъ называть его «замыкающимъ типомъ замерзанія» въ отличіе отъ другого предѣльнаго случая, названнаго нами «луковичнымъ типомъ замерзанія».

Положимъ, что такое замыканіе произошло, и что дальнѣйшее замерзаніе пойдетъ въ видѣ параллельныхъ слоевъ. Тогда по замерзаніи всей массы каждый кубикъ будетъ состоять изъ ряда слоевъ, расположенныхъ въ той же послѣдовательности, какъ и въ кубѣ на рис. 34, а именно 1) изъ внѣшнихъ ненасыщенныхъ слоевъ; 2) изъ насыщенныхъ слоевъ; 3) изъ эвтектики. Разумѣется, тѣ причины, которыя повели къ подраздѣленію всего куба на 27 кубиковъ, на самомъ дѣлѣ должны были бы повести къ подраздѣленію послѣднихъ на меньшіе кубики, этихъ на еще меньшіе и т. д. и въ концѣ концовъ вся масса должна была бы быть подраздѣлена на микроскопическія ячейки, какъ это и видно на рис. 36.

Въ каждой изъ этихъ ячеекъ долженъ произойти тотъ же рядъ явленій, какъ если бы замерзаніе шло указаннымъ на рис. 34 путемъ. Каждая ячейка должна содержать тотъ же рядъ отложеній: 1) раньше другихъ отложившіеся ненасыщенные слои, 2) насыщенные слои и 3) эвтектику.

Дифференціація въ микроскопическихъ кубикахъ должна повести къ микроскопической ликваціи, которую можно наблюдать не только на рис. 36, но и на 17, 18, 20 и 21—23. Во всѣхъ этихъ случаяхъ обнаруживается микроскопическая ликвація. На всѣхъ этихъ рисункахъ, за исключеніемъ рис. 36, ликвація выражается въ томъ, что микроскопическія массы эвтектики окружены ранѣе замерзшимъ избыточнымъ веществомъ. На рис. 36 эвтектической структуры нельзя различить, но за то ясно видны ненасыщенные слои, обнаруживающіе слѣды своей первоначальной неоднородности. Напримѣръ, какъ было указано на пространствѣ ниже буквы *A*, бѣлые и черные участки переходятъ другъ въ друга совершенно постепенно.

81) Ликвація происходитъ одновременно микроскопическая и макроскопическая.—До сего времени мы принимали существованіе двухъ типовъ замерзанія. При первомъ, или «луковичномъ» типѣ, указанномъ на рис. 34, замерзающая масса образуетъ одно цѣлое; отростки не проникаютъ въ маточный ме-

таллъ и не вызываютъ его подраздѣленія. Маточный металлъ во все время замерзанія остается цѣльнымъ открытымъ моремъ съ гладкими берегами и дномъ, при чемъ берега, бока и дно его образуютъ кубъ, въ каждый данный моментъ концентричный съ стѣнками изложницы.

Каждый слой при отложеніи образуетъ непрерывную поверхность куба, окружающаго со всѣхъ сторонъ это открытое море; такимъ образомъ, послѣднее постепенно совершенно заполнится путемъ отложенія ряда слоевъ, изъ которыхъ каждый концентриченъ съ первоначальною формою моря. Слѣдовательно, море не только сохраняетъ свою первоначальную форму, но и свой первоначальный центръ, до тѣхъ поръ, пока оно не будетъ заполнено и окончательно не исчезнетъ.

Второй типъ замерзанія—«замыкающій»—схематически представленъ на рис. 41; къ нему же относится и рис. 36. Въ этомъ случаѣ, въ самомъ началѣ замерзанія море подраздѣляется на извѣстное число отдѣльныхъ бассейновъ, совершенно изолированныхъ между собой перегородками, выростающими отъ одного берега до другого. Въ каждомъ изъ такихъ бассейновъ замерзаніе идетъ по первому типу; подраздѣленіемъ же этихъ бассейновъ на микроскопическіе бассейны и обусловливается микроскопическая ликвація.

Необходимо, такимъ образомъ, признать, что замерзаніе идетъ по обоимъ типамъ одновременно. Съ одной стороны, море частью заполняется отлагающимися слоями, съ другой стороны, идетъ процессъ замыканія бассейновъ, вызываемый тѣмъ, что концентрическіе слои возникаютъ не въ видѣ гладкихъ перегородокъ, а скорѣе напоминаютъ собой по строенію мохъ. Заполненіе моря идетъ не путемъ отложенія мельчайшихъ частичекъ въ видѣ гладкихъ слоевъ по его стѣнкамъ и по дну, но путемъ роста массы, имѣющей видъ мха или торфа, или какъ бы лѣса, состоящаго изъ мельчайшихъ елочекъ.

Въ каждый данный моментъ масса сплава, въ цѣломъ, состоитъ: 1) изъ уже замерзшаго материка, 2) изъ береговыхъ слоевъ, гдѣ идетъ отложеніе слоевъ, и 3) изъ еще открытаго центральнаго моря, включая сюда и береговую полосу. Но и строеніе берегового слоя въ свою очередь представляется сложнымъ, подобно тому, какъ это изображено на рис. 42. Съ внутренней стороны, верхушки *A* маленькихъ елочекъ вдаются въ откры-

тое центральное море. Съ внѣшней стороны ихъ утолщенные стволы и вѣтви тѣсно сплетаются между собой, совершенно заполняя промежутки. Масса является твердой, какъ въ *B*. Отъ *A* до *B* мы имѣемъ сначала рядъ открытыхъ бухтъ *C*, затѣмъ хорошо защищенныхъ гаваней *D*, затѣмъ гаваней *E*, входъ въ которыя сильно затрудненъ отмелями, и, наконецъ, совершенно замкнутыхъ бассейновъ *F*.

Въ каждомъ изъ этихъ замкнутыхъ бассейновъ замерзаніе идетъ обычнымъ избирательнымъ путемъ. Первые слои содержатъ меньше висмута [1]), чѣмъ бассейнъ изъ котораго они отлагаются, и который состоитъ изъ маточнаго металла. Эти слои образуютъ все болѣе распространяющіеся берега бассейна.

По мѣрѣ дальнѣйшаго хода, замерзанія отлагающіеся слои становятся все богаче висмутомъ, такъ что ко времени окончательнаго исчезновенія бассейна замерзающая послѣдней частичка его оказывается болѣе богатой висмутомъ, чѣмъ бассейнъ въ моментъ замыканія. Такимъ образомъ, замерзаніе каждаго изъ такихъ замкнутыхъ бассейновъ ведетъ къ микроскопической ликваціи.

Въ то же время, однако, идетъ и макроскопическая ликвація въ силу той же причины, какъ и при луковичномъ типѣ замерзанія. Разница между этими двумя случаями состоитъ въ томъ, что 1) въ настоящемъ случаѣ береговой слой является зазубреннымъ, тогда какъ изображенный на рис. 34 гладокъ, и 2) происходитъ образованіе замкнутыхъ бассейновъ. Но ни одно изъ этихъ различій не въ состояніи воспрепятствовать обогащенію маточнаго металла, открытаго моря. Обогащеніе идетъ совершенно одинаково, независимо отъ того, гладки ли вымерзающіе слои или зазубрены.

Остановимся на минуту на ростѣ одной какой-либо елочки *A*, рис. 42. На ней отлагается очень тонкій слой металла; этотъ слой богаче оловомъ и бѣднѣе висмутомъ, чѣмъ открытое море, изъ котораго онъ вымерзаетъ. Вслѣдствіе этого непосредственно прилегающій слой моря обогащается висмутомъ. Этотъ избытокъ висмута диффундируетъ въ открытое море, которое вслѣдствіе этого постепенно имъ обогащается. Указанный процессъ можно попытаться представить стрѣлками, какъ на рис. 42. Обогащеніе

---

[1]) Мы все еще продолжаемъ изучать сплавъ олова съ висмутомъ.

открытаго моря висмутомъ, которое произошло при отложеніи одного слоя, будетъ идти далѣе и при отложеніи послѣдующихъ слоевъ. Такимъ образомъ, по мѣрѣ схожденія береговъ море все больше обогащается висмутомъ, но въ то же время и уровень его все падаетъ. При этомъ и послѣдовательно отлагающіеся слои, образующіе изогнутую линію берега, становятся все богаче вис-

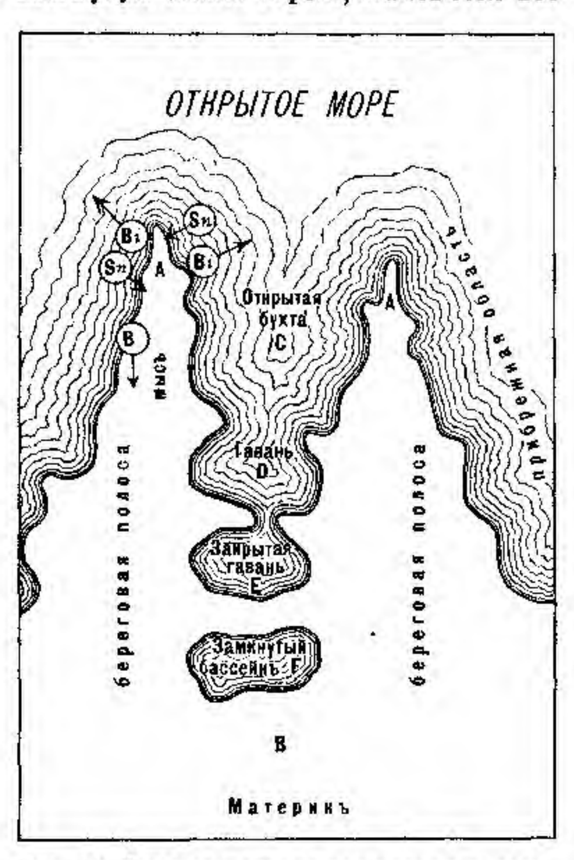


Рис. 42. Береговые слои и прибрежная полоса.

мутомъ. Очевидно, мы имѣемъ дѣло съ тѣмъ же явленіемъ, которое было представлено на рис. 34. Все различіе состоитъ только въ томъ, что на рис. 34 слои гладки, тогда какъ здѣсь они зазубрены; кромѣ того, въ первомъ случаѣ слои, будучи сами по себѣ однородны, отличаются другъ отъ друга тѣмъ, что каждый слой богаче висмутомъ, чѣмъ непосредственно къ нему примыкающій слой болѣе ранняго происхожденія; во второмъ же случаѣ слои неоднородны, вслѣдствіе микроскопической ликваціи.

Необходимо хорошо уяснить себѣ такого рода двоякую неоднородность, двоякую ликвацію, микроскопическую и макроскопическую. *Равнымъ образомъ, важно имѣть въ виду* постепенное обогащеніе висмутомъ всей массы отъ периферіи къ центру, а также и обогащеніе по мѣрѣ перехода отъ одного слоя къ другому въ тѣхъ частяхъ, которыя представляли собой центральныя области замкнутыхъ бассейновъ.

82) Постепенное измѣненіе хода микроскопической ликваціи.—Изъ сказаннаго вполнѣ очевидно, что характеръ микроскопической ликваціи долженъ измѣняться по мѣрѣ перехода отъ внѣшнихъ слоевъ къ внутреннимъ. Однако, быть можетъ не будетъ лишнимъ пояснить это въ немногихъ словахъ.

Мы видѣли, какъ по мѣрѣ утолщенія стѣнокъ твердаго материка, образующаго уже замерзшую часть болванки, остающееся открытое море обогащается висмутомъ, раствореннымъ металломъ. Во всякій данный моментъ составъ каждаго залива, изображеннаго на рис. 42, долженъ быть весьма близокъ къ составу открытаго моря. Составъ отчасти загражденныхъ гаваней долженъ быть также близокъ къ составу открытаго моря, хотя и не настолько, какъ открытыхъ бухтъ. По крайней мѣрѣ составъ ихъ долженъ измѣняться параллельно съ составомъ открытаго моря, хотя и не необходимо въ одинаковой мѣрѣ, вслѣдствіе непрерывнаго увеличенія отмелей. Если не принимать во вниманіе этой неодинаковой скорости измѣненія состава, можно допустить, что составъ каждаго бассейна къ тому моменту, когда его сообщеніе съ открытымъ моремъ прерывается, долженъ быть весьма близокъ къ составу послѣдняго. Такимъ образомъ, составъ замкнутыхъ бассейновъ, образующихся въ послѣдовательныхъ слояхъ, къ моменту окончательнаго ихъ замыканія долженъ постепенно измѣняться отъ слоя къ слою. Каждый бассейнъ въ моментъ замыканія долженъ быть богаче висмутомъ, чѣмъ бассейны, образовавшіеся ранѣе его, въ моментъ ихъ замыканія.

Составъ же каждаго даннаго бассейна въ моментъ замыканія главнымъ образомъ и опредѣляетъ тотъ родъ слоевъ, который долженъ образоваться при его замерзаніи. Каждый бассейнъ послѣ замыканія становится совершенно независимымъ отъ остальной части сплава.

Дѣло обстоитъ такъ, какъ будто бы первоначальный составъ каждаго бассейна былъ неодинаковъ. Въ § 60 мы уже указывали,

что въ серіи сплавовъ двухъ металловъ, обладающихъ ограниченной взаимной растворимостью, средніе члены должны образовывать эвтектику, конечные же—нѣтъ. Точно также и въ нѣкоторыхъ изъ этихъ бассейновъ при замерзаніи будетъ образовываться эвтектика, въ другихъ же не будетъ.

Такъ, бассейны, образовавшіеся въ внѣшней части болванки въ ранній періодъ замерзанія, когда едва ли еще можно говорить о какомъ-либо обогащеніи открытаго моря, могутъ содержать настолько мало растворённаго металла, что обогащеніе послѣдовательныхъ слоевъ во время замерзанія едва ли можетъ достигнуть точки насыщенія. Такіе бассейны могутъ повести къ образованію только ненасыщенныхъ слоевъ.

Другіе бассейны, образовавшіеся нѣсколько позднѣе, когда уже обогащеніе открытаго моря пошло дальше, могутъ содержать къ моменту замыканія такое количество растворённаго металла, что обогащеніе послѣдовательно образующихся слоевъ пройдетъ черезъ точку насыщенія. Въ этомъ случаѣ, точно такъ же, какъ и въ § 64, должны образоваться не только насыщенные слои, но и нѣкоторое количество эвтектики. Бассейны, образовавшіеся еще позднѣе и содержащіе еще большее количество растворённаго металла, должны повести къ образованію болѣе значительнаго количества эвтектики и т. д.

83) Приближеніе къ одному изъ этихъ двухъ типовъ. — Хотя, безъ сомнѣнія, замерзаніе никогда не слѣдуетъ вполнѣ одному изъ предѣльныхъ типовъ, луковичному или замыкающему, однако, на основаніи нѣкоторыхъ чертъ, бываетъ возможно отнести его ближе къ тому или другому типу. Чѣмъ раньше вырастающіе елочки встрѣтятся въ центрѣ, тѣмъ ближе будетъ замерзаніе къ предѣльному замыкающему типу (рис. 41), при которомъ совершенно невозможна макроскопическая ликвація, и тѣмъ меньше она будетъ выражена. Въ общемъ можно сказать, что чѣмъ уже открытое море, т. е. чѣмъ уже изложница, въ которую отливается металлъ, тѣмъ раньше встрѣтятся елочки. Далѣе, чѣмъ дальше проникнутъ эти елочки въ открытое море, тѣмъ раньше произойдетъ ихъ сліяніе. Хотя вполнѣ опредѣленно и не представляется возможнымъ сказать, какіе металлы будутъ образовывать наиболѣе длинные отростки, однако можно ожидать, что металлы съ большей теплопроводностью будутъ образовывать болѣе длинные отростки, чѣмъ металлы съ малой тепло-

проводностью. Вязкіе металлы должны образовывать болѣе длинные отростки, чѣмъ легкоподвижные, потому что въ первыхъ будетъ возникать меньше конвекціонныхъ токовъ. Можно думать, что послѣдніе должны препятствовать росту елочекъ съ длинными стволами, обламывая и размывая эти стволы. Какъ извѣстно, только при замерзаніи тихихъ бассейновъ ледъ образуетъ длинныя иглы.

Итакъ, можно предположить, что макроскопическая ликвація будетъ наименѣе выражена 1) въ узкихъ болванкахъ, 2) у металловъ, обладающихъ большой вязкостью и хорошей теплопроводностью.

83А) Условія, вліяющія на ходъ ликваціи.—Въ §§ 84—93 мы разсмотримъ вопросъ, насколько степень ликваціи въ охлажденномъ сплавѣ зависитъ отъ скорости замерзанія и охлажденія его ниже точки замерзанія. Это разсужденіе будетъ носить предположительный характеръ. Былъ намѣченъ и начатъ рядъ изслѣдованій, съ цѣлью провѣрки тѣхъ выводовъ, къ которымъ приводитъ данное разсужденіе, но, къ сожалѣнію, опыты не представляется возможнымъ закончить достаточно скоро, чтобы воспользоваться выводами изъ нихъ въ этомъ трудѣ. Однако, казалось полезнымъ привести это разсужденіе, какъ извѣстное упражненіе, а также потому, что оно можетъ по крайней мѣрѣ дать возможность ознакомиться съ извѣстными взглядами на этотъ предметъ. Кромѣ того оно приводитъ къ гипотезѣ, нуждающейся въ опытной провѣркѣ, а это обстоятельство является уже ступенью для болѣе глубокаго пониманія даннаго предмета.

Для упрощенія ограничимся только сплавами не образующими эвтектики, т. е. сплавами, у которыхъ она отсутствуетъ по достиженіи ими состоянія равновѣсія. Иными словами, въ этихъ сплавахъ одинъ изъ входящихъ въ составъ металловъ теоретически способенъ нацѣло растворить другой.

Такой сплавъ можетъ содержать эвтектику въ томъ случаѣ, если равновѣсіе не достигнуто; но эвтектика при улучшеніи условій диффузіи можетъ въ дальнѣйшемъ исчезнуть (§ 96).

84) Диффузія стремится уменьшить ликвацію.— Разсмотрѣнная нами неоднородная структура сплава, содержащаго три группы слоевъ 1) ненасыщенные и 2) насыщенные висмутомъ слои олова и 3) эвтектику, конечно, далеко не соотвѣтствуетъ условіямъ равновѣсія. Уже одна первоначальная неоднородность не-

насыщенныхъ слоевъ указываетъ на отсутствіе равновѣсія; ибо, изъ позднѣе отложившейся и болѣе богатой висмутомъ части этихъ ненасыщенныхъ слоевъ, послѣдній стремится диффундировать въ болѣе ранніе и болѣе бѣдные имъ слои. Точно также, изъ насыщенныхъ слоевъ висмутъ стремится диффундировать въ ненасыщенные слои, и такимъ образомъ первоначально насыщенные слои стремятся обратиться въ ненасыщенные. Затѣмъ въ эти слои, превратившіеся въ ненасыщенные, имѣетъ стремленіе диффундировать висмутъ изъ эвтектики. Такимъ образомъ, это стремленіе, поскольку оно находитъ осуществленіе, ведетъ къ уменьшенію количества эвтектики, вызывая перегруппировку составляющихъ ее металловъ, подобно тому, какъ группировка 3 переходила въ группировку 4, а послѣдняя въ свою очередь въ группировку 1 (§ 73). Если переносъ висмута изъ эвтектики въ слои 2 вызоветъ такое обѣднѣніе ея висмутомъ, что содержащееся въ ней олово будетъ теоретически въ состояніи растворить остатокъ его нацѣло, тогда, какъ мы уже видѣли въ § 71, произойдетъ перегруппировка, способствующая растворенію висмута. При полномъ удовлетвореніи этого стремленія, эвтектика исчезнетъ и замѣнится твердымъ растворомъ висмута въ оловѣ. Въ концѣ концовъ, путемъ дальнѣйшей диффузіи, этотъ растворъ можетъ достигнуть полной однородности, и исчезнетъ какъ микроскопическая, такъ и макроскопическая ликвація.

Это можетъ произойти и при очень значительной первоначальной ликваціи болванки, даже если бы ея толщина и достигала нѣсколькихъ футъ.

85) Диффузія уменьшаетъ какъ микроскопическую, такъ и макроскопическую ликвацію. Нивеллирующее дѣйствіе диффузіи, очевидно, проявляется какъ при микроскопической, такъ и макроскопической ликваціи. Диффузія стремится уничтожить какъ ту, такъ и другую, и свести сплавъ 1) къ однородному твердому раствору, если (какъ это и принимается въ настоящемъ разсужденіи) металлы, составляющіе сплавъ, находятся въ такой пропорціи, что одинъ изъ нихъ теоретически способенъ растворить другой нацѣло; или 2) къ эвтектикѣ и насыщенному однородному твердому раствору, если ни одинъ изъ металловъ не въ состояніи растворить другой нацѣло.

86) Насколько полна диффузія?—Въ обычныхъ условіяхъ техническаго производства, очевидно, это стремленіе не находитъ

полнаго удовлетворенія. Въ большихъ болванкахъ стали диффузія недостаточна, чтобы можно было избѣжать макроскопической ликваціи, хотя бы охлажденіе и велось въ теченіе многихъ часовъ. Обычно, эти болванки сильно ликвируютъ, такъ что въ нѣкоторыхъ спеціальныхъ случаяхъ, напримѣръ при ковкѣ орудій, ликвировавшая осевая часть удаляется и идетъ въ отбросъ.

Насколько уменьшается микроскопическая ликвація путемъ диффузіи, еще не достаточно изслѣдовано. Конечно, постепенный переходъ оттѣнковъ, указанный на рис. 32 и 36, сильно говоритъ за то, что, несмотря на диффузію, первоначальная микроскопическая неоднородность остается еще въ сильной степени. Однако эти указанія надо принимать съ большою осторожностью. Даже очень опытный изслѣдователь микроструктуры долженъ быть осторожевъ при объясненіи такихъ признаковъ. Ибо, хотя постепенный переходъ въ оттѣнкѣ и можетъ вызываться соотвѣтствующей неоднородностью сплава, однако онъ можетъ быть вызванъ и подготовкой поверхности металла для микроскопическаго изслѣдованія.

Но помимо этихъ указаній, вполнѣ естественно предположить, что чѣмъ медленнѣе совершается охлажденіе, начиная отъ точки замерзанія, тѣмъ легче идетъ диффузія и тѣмъ меньше должна быть въ результатѣ ликвація.

Чрезвычайно важно всегда имѣть въ виду, что долговременное нагрѣваніе сплава немного ниже температуры плавленія эвтектики способствуетъ уравнивающему дѣйствію диффузіи, тогда какъ выдерживаніе его при температурѣ промежуточной между верхней и нижней точками замерзанія, можетъ усилить ликвацію. При температурахъ между этими двумя точками, сплавъ, взятый въ цѣломъ, частью находится въ твердомъ состояніи, частью въ расплавленномъ. Расплавленная часть стремится слиться, коагулировать, а при благопріятныхъ условіяхъ, даже и выдѣлиться изъ массы сплава въ видѣ капель.

87) Замерзаніе способствуетъ дифференціаціи сплава, диффузія же—выравниванію. —Необходимо признать, что замерзаніе и диффузія проявляютъ діаметрально противуположныя стремленія. Замерзаніе представляетъ собой процессъ дифференціаціи, направленный къ расщепленію сплава на три группы компонентовъ, указанныхъ на рис. 34, съ которыми мы уже теперь хо-

рою ознакомились. Диффузія же представляетъ собой процессъ выравниванія, направленный къ сглаживанію той неоднородности, которая вызывается замерзаніемъ.

Мы видѣли, что скорость охлажденія ниже температуры періода замерзанія должна влiять на степень ликваціи; попытаемся установить теперь, какъ будетъ влiять на ликвацію скорость охлажденія во время самаго періода замерзанія. Прежде всего, однако, слѣдуетъ замѣтить, что въ періодѣ замерзанія одновременно совершаются два процесса—съ одной стороны дифференціація, идущая въ замерзающихъ частичкахъ, съ другой стороны выравниваніе состава ранѣе отложившихся слоевъ, путемъ диффузіи. Ускоряя замерзаніе даннаго слоя, мы тѣмъ самымъ ускоряемъ и охлажденіе ранѣе отложившихся слоевъ, а это обстоятельство затрудняетъ выравниваніе ихъ состава.

Пока мы не будемъ принимать во вниманіе только что указаннаго вліянія скорости охлажденія въ періодѣ замерзанія и сосредоточимъ наше вниманіе исключительно на вліяніи, которое оказываетъ быстрое охлажденіе на дифференціацію, вызываемую замерзаніемъ.

Въ дальнѣйшемъ мы займемся и другими сторонами этой задачи, а также дадимъ сводку полученныхъ результатовъ (таблица 2).

88) Быстрое охлажденіе должно уменьшать ликвацію. — Точно такъ же, какъ быстрое охлажденіе ниже точки замерзанія должно препятствовать выравнивающему дѣйствію диффузіи, повидимому, и быстрое охлажденіе въ періодѣ замерзанія ослабляетъ дифференціацію, вызываемую замерзаніемъ. Такъ, на рис. 35 видно, что дифференціація, которую обнаруживаетъ болванка въ цѣломъ, не проявляется въ ея внѣшнихъ слояхъ. Постепенное повышеніе содержанія углерода отъ наружныхъ слоевъ къ внутреннимъ начинается только на значительной глубинѣ отъ внѣшней корки.

Вполнѣ естественно предположить что это вызывается замедленіемъ дифференціаціи, вслѣдствіе чрезвычайной быстроты охлажденія.

Чрезвычайно быстрое охлажденіе задерживаетъ въ внѣшнихъ слояхъ обѣднѣніе, которое должно было бы необходимо явиться слѣдствіемъ дифференціаціи; по этой причинѣ внѣшніе слои содержатъ углерода больше, чѣмъ если бы дифференціація и обѣднѣніе шли въ полной мѣрѣ естественнымъ путемъ.

Вышесказанное мы постараемся пояснить нѣсколько полнѣе.

Припомнимъ, какъ идетъ замерзаніе. Первый замерзшій слой, благодаря дифференціаціи, оказывается болѣе чистымъ, т. е. содержащимъ менѣе углерода, чѣмъ расплавленный металлъ, изъ котораго онъ вымерзаетъ; такимъ образомъ, при замерзаніи перваго слоя образуются два тѣла: слой съ меньшимъ содержаніемъ углерода и остаточный маточный металлъ съ большимъ. Слѣдующій по порядку замерзанія слой, однако, будучи бѣднѣе по содержанію углерода, чѣмъ маточный металлъ, изъ котораго онъ возникаетъ, долженъ быть богаче углеродомъ, чѣмъ первый слой. Объясняется это тѣмъ, что маточный металлъ, изъ котораго вымерзаетъ второй слой, богаче углеродомъ, чѣмъ маточный металлъ, изъ котораго вымерзъ первый слой. И далѣе, каждый послѣдующій слой въ моментъ возникновенія долженъ быть богаче углеродомъ, чѣмъ только что передъ нимъ вымерзшій слой; въ этомъ, собственно, и выражается явленіе дифференціаціи.

Такимъ образомъ, дифференціація, обѣднѣніе ранѣе вымерзшихъ слоевъ, должна вести къ обогащенію углеродомъ болѣе позднихъ слоевъ. Такое обогащеніе должно совершаться непрерывно, если дифференціація идетъ нормальнымъ путемъ. Послѣ застыванія всей болванки анализъ долженъ былъ бы указать на постепенное повышеніе процентнаго содержанія углерода, начиная отъ замерзшихъ первыми внѣшнихъ слоевъ до послѣдняго внутренняго.

Если бы было возможно найти какой-либо способъ воспрепятствовать дифференціаціи, тогда никакого бы обѣднѣнія рано замерзающихъ слоевъ не было, и масса по застываніи оказалась бы совершенно однородной. При частичной задержкѣ дифференціаціи, напримѣръ въ тѣхъ слояхъ, которые замерзаютъ первыми, произошла бы извѣстная задержка и въ обѣднѣніи ихъ, т. е. содержаніе углерода въ нихъ было бы больше, чѣмъ при нормальномъ ходѣ дифференціаціи. Короче говоря, содержаніе углерода въ этихъ слояхъ было бы ненормально высоко.

Итакъ, при задержкѣ дифференціаціи внѣшнихъ слоевъ, вызывающей въ нихъ ненормально высокое содержаніе углерода, но въ то же время при нормальномъ ходѣ дифференціаціи въ нѣсколько позже вымерзающихъ слояхъ, внѣшніе слои могутъ быть богаче углеродомъ, чѣмъ внутренніе.

Повидимому, это и произошло въ нижней части болванки, представленной на рис. 35. Нижняя часть должна замерзать съ

наибольшей быстротой, потому что она находится въ соприкосновеніи не только съ холодными стѣнками изложницы, но и съ холоднымъ ея дномъ, тогда какъ верхняя часть соприкасается съ воздухомъ. Кромѣ того, болѣе горячій металлъ долженъ подниматься кверху и тѣмъ задерживать замерзаніе. Просматривая пять нижнихъ горизонтальныхъ рядовъ цифръ, можно видѣть, что внѣшній слой богаче углеродомъ, чѣмъ слѣдующій за нимъ. Здѣсь, слѣдовательно, прогрессивное обогащеніе послѣдовательно замерзшихъ слоевъ начинается не въ самой коркѣ, а на значительной глубинѣ отъ нея.

Повидимому, обѣднѣнію внѣшнихъ слоевъ было поставлено извѣстное препятствіе, вслѣдствіе чего оно и не достигло нормальной степени. Мы полагаемъ, что виною этому очень быстрое охлажденіе внѣшнихъ слоевъ, вызвавшее задержку въ ихъ обѣднѣніи, слѣдствіемъ которой и является ненормально высокое содержаніе углерода.

Говорить о ненормально высокомъ содержаніи углерода въ коркѣ все равно, что говорить о томъ, что желѣзо здѣсь, хотя, конечно, и не насыщено, но гораздо ближе къ насыщенію углеродомъ, чѣмъ если бы дифференціація и обѣднѣніе шли нормальнымъ путемъ. За вѣрность этого объясненія говоритъ и тотъ фактъ, что при очень быстромъ охлажденіи, затвердѣвшій металлъ можетъ оказаться не только ненормально близкимъ къ насыщенію, но даже и пересыщеннымъ.

Такъ, чугунъ въ расплавленномъ состояніи содержитъ въ растворѣ большое количество углерода, значительную часть котораго, при очень медленномъ замерзаніи, онъ выдѣляетъ въ видѣ графита. Но при очень быстромъ замерзаніи чугунъ удерживаетъ въ растворѣ очень значительную часть углерода, которая при медленномъ охлажденіи должна была бы изъ него выдѣлиться. Значительность этого избытка указываетъ на то, что при быстромъ замерзаніи чугунъ въ сильной степени пересыщается углеродомъ.

Подобное же явленіе наблюдается и при закалкѣ стали, которая, какъ извѣстно, состоитъ изъ желѣза и углерода. Свыше извѣстной критической температуры желѣзо, входящее въ составъ стали, находится въ состояніи гамма; гамма-желѣзо легко растворяетъ углеродъ и образуетъ твердый растворъ. При охлажденіи ниже извѣстной критической температуры, гамма-желѣзо

переходитъ въ альфа-желѣзо, въ которомъ, повидимому, углеродъ совершенно нерастворимъ, или, если и растворимъ, то чрезвычайно мало. При нормальномъ ходѣ вещей, когда гамма-желѣзо переходитъ въ альфа-желѣзо, углеродъ выдѣляется изъ раствора, въ силу нерастворимости въ альфа-желѣзѣ, и соединяется съ частью желѣза, образуя опредѣленный карбидъ, Fe_3C, называемый цементитомъ. Такимъ образомъ, охлажденная сталь нормально состоитъ изъ механической смѣси 1) альфа-желѣза, свободнаго отъ углерода, и 2) цементита. Такую смѣсь можно наблюдать въ медленно охлажденной, или отожженной стали. При очень же быстромъ охлажденіи стали, находящейся свыше критической температуры, переходъ изъ гамма- въ альфа-состояніе до извѣстной степени задерживается, и получается механическая смѣсь, состоящая частью изъ цементита, частью изъ желѣза, содержащаго въ растворѣ углеродъ, хотя послѣдній нормальнымъ образомъ и нерастворимъ въ желѣзѣ при этой температурѣ. Углеродъ удерживается въ растворѣ потому, что переходъ черезъ критическій температурный интервалъ, въ которомъ подвижность молекулъ достаточно велика для того, чтобы углеродъ могъ выдѣлиться изъ раствора, совершается слишкомъ быстро, чтобы выдѣленіе могло произойти нацѣло. Болѣе подробное объясненіе этому явленію будетъ дано въ главѣ VIII.

Очень быстрое охлажденіе не только задерживаетъ тѣ измѣненія, которыя нормально должны были бы произойти ниже извѣстной температуры, но вызываетъ и абсолютное пересыщеніе металла углеродомъ.

Это наблюдается не только дяя однихъ сплавовъ желѣза. Wm. Campbell нашелъ, что въ нѣкоторыхъ сплавахъ мѣди съ оловомъ, образующихъ эвтектику, при нормальномъ ходѣ охлажденія, послѣдняя отсутствуетъ при очень быстромъ охлажденіи въ водѣ [1]). Очень возможно, что дальнѣйшія изслѣдованія укажутъ, что это справедливо также и по отношенію къ цѣлому ряду другихъ сплавовъ.

Въ существенныхъ чертахъ здѣсь дѣло обстоитъ слѣдующимъ образомъ.

Растворенное вещество, которое при нормальныхъ условіяхъ медленнаго замерзанія должно было бы выдѣлиться, какъ отдѣльная

---

[1]) «Microscopical Examination of the Alloys of Copper and Tin», «Proc. Institution Mechanical Engineers», Dec. 20, 1901.

составляющая, какъ, напр., графитъ изъ чугуна или эвтектика изъ сплава, образующаго эвтектику, — не выдѣляется такимъ образомъ при очень быстромъ охлажденіи.

Безъ сомнѣнія, въ нѣкоторыхъ случаяхъ составляющая, находимая въ медленно охлажденномъ сплавѣ, не можетъ быть обнаружена въ сплавѣ, подвергшемся очень быстрому охлажденію, потому что въ послѣднемъ случаѣ получается структура настолько мелкая, что она не поддается разсмотрѣнію подъ микроскопомъ. Это объясняется тѣмъ, что при медленномъ охлажденіи эвтектика, или иное выдѣляющееся тѣло, образуютъ настолько большія частички, что ихъ можно было разсмотрѣть подъ микроскопомъ; при очень быстромъ охлажденіи, хотя и образуются тѣ же частички, но онѣ настолько малы, что различить ихъ не представляется возможнымъ. Другими словами, очень быстрое охлажденіе можетъ воспрепятствовать образованію эвтектики, вызвавъ пересыщеніе или, по крайней мѣрѣ, очень высокую концентрацію; или же оно можетъ только повести къ образованію скрытой эвтектики, т. е. такой, которую нельзя обнаружить подъ микроскопомъ. Мы убѣждены, что въ случаѣ чугуна и стали, при очень быстромъ охлажденіи, дѣло не ограничивается только образованіемъ такой скрытой структуры, потому что подъ его вліяніемъ происходятъ настолько значительныя измѣненія физическихъ и химическихъ свойствъ сплава, что они едва ли могутъ быть отнесены исключительно на счетъ болѣе мелкой структуры.

Возможно, что большая скорость охлажденія понижаетъ температуру *aBc*. Въ аналогичномъ, до извѣстной степени, случаѣ, который представляютъ собой измѣненія въ желѣзѣ въ твердомъ состояніи, Osmond уже давно нашелъ, что ускореніе охлажденія понижаетъ температуру, при которой они происходятъ [1]).

89) Быстрое охлажденіе должно въ особенности задерживать макроскопическую ликвацію. Помимо вышеуказанной причины общаго характера, существуетъ еще причина спеціальнаго характера, почему внезапное охлажденіе должно задерживать макроскопическую или осевую ликвацію.

Въ §§ 81 и 82, а также на рис. 42 было указано, что при вымерзаніи избыточнаго металла или растворителя, олова, содер-

---

[1]) «Transformation du Fer et du Carbone», 1888, стр. 36.

жащаго извѣстное количество висмута, часть послѣдняго не замерзаетъ вслѣдствіе того, что замерзаніе идетъ избирательное. Висмутъ, такимъ образомъ, освобождается и диффундируетъ въ открытое море, которое постепенно и обогощается этимъ металломъ. Мы видѣли также, что содержаніе висмута въ каждомъ замкнутомъ бассейнѣ приблизительно одинаково съ содержаніемъ его въ открытомъ морѣ въ моментъ замыканія бассейна. Послѣднее положеніе мы основывали на томъ, что предполагали ходъ замерзанія настолько медленнымъ, что освободившійся висмутъ могъ путемъ диффузіи распространяться равномѣрно по всему морю. Но, строго говоря, содержаніе висмута въ каждомъ бассейнѣ должно скорѣе соотвѣтствовать содержанію висмута въ прибрежной полосѣ, а не среднему содержанію его во всемъ морѣ, ибо подвергается замыканію вѣдь прибрежная полоса.

При очень быстромъ замерзаніи, т. е. при очень быстромъ центростремительномъ перемѣщеніи берега и береговой полосы, освободившемуся висмуту представляется очень мало времени для диффузіи въ сторону моря. Вслѣдствіе этого, прибрежная полоса, включая сюда и замкнутыя ея части въ видѣ бассейновъ, будетъ богаче висмутомъ, чѣмъ открытое море. Въ замкнутыхъ бассейнахъ, такимъ образомъ, будетъ заключено больше висмута, чѣмъ если бы охлажденіе велось медленно; слѣдовательно, меньшее количество висмута будетъ переходить по направленію къ центру, и макроспическая или осевая ликвація подъ вліяніемъ этого обстоятельства будетъ гораздо слабѣе. Однимъ словомъ, быстрое охлажденіе должно задерживать осевую ликвацію.

90) Сопоставленіе обоихъ отличительныхъ признаковъ, характеризующихъ очень быстрое охлажденіе въ періодѣ замерзанія. Мы видѣли, что очень быстрое охлажденіе въ періодѣ замерзанія, 1) ослабляя диффузію въ уже замерзшихъ слояхъ, ведетъ къ усиленію ликваціи; 2) ускоряя процессъ замерзанія, ведетъ къ ослабленію ликваціи.

Такимъ образомъ, быстрое охлажденіе въ этомъ періодѣ оказываетъ два противуположныхъ дѣйствія. Которое изъ нихъ сильнѣе, сказать напередъ довольно трудно. Для руководства можно, однако, замѣтить слѣдующее. Въ качество иллюстраціи къ высказываемому мною положенію, возьмемъ крайній случай, предположивъ, что охлажденіе въ этомъ періодѣ идетъ чрезвы-

чайно медленно, положимъ—въ теченіе года. Если кому нибудь этотъ періодъ покажется не достаточно длиннымъ, тотъ можетъ увеличить его по своему желанію. Далѣе положимъ, что замерзаніе совершается совершенно равномѣрно въ теченіе всего періода. Къ концу одиннадцатаго мѣсяца, когда истечетъ 92% этого періода времени, замерзнутъ 92% всей массы. Остается еще мѣсяцъ для того, чтобы составъ замерзшей части массы могъ выровняться путемъ диффузіи. Положимъ, что для полнаго выравниванія мѣсяца будетъ достаточно.

Къ концу одиннадцати съ половиной мѣсяцевъ замерзнетъ приблизительно 96%; остается еще двѣ недѣли для того, чтобы въ ранѣе вымерзшихъ слояхъ могъ распредѣлиться избытокъ любого элемента, содержащагося въ тѣхъ 4%, которые отложились за двѣ послѣднія недѣли. Положимъ, что для полнаго распредѣленія этого промежутка времени будетъ достаточно.

Продолжая разсуждать и дальше точно такимъ же образомъ, мы убѣдимся, что при очень медленномъ ходѣ замерзанія улучшеніе условій диффузіи будетъ болѣе чѣмъ достаточно для того, чтобы компенсировать дифференціацію, которую вызываетъ замерзаніе, въ особенности медленное.

Приведенныя выше соображенія приводятъ къ слѣдующему заключенію. По сравненію съ умѣренно-медленнымъ охлажденіемъ въ періодѣ замерзанія, чрезвычайно медленное охлажденіе должно вести къ большей однородности, вслѣдствіе лучшихъ условій диффузіи.

Чрезвычайно быстрое охлажденіе въ томъ же періодѣ, по сравненію съ умѣренно-быстрымъ, должно вести также къ большей однородности, ибо первое больше затрудняетъ дифференціацію, вызываемую замерзаніемъ.

91) Ходъ охлажденія, при которомъ ликвація будетъ менѣе всего выражена. Займемся теперь этими двумя послѣдовательными явленіями: 1) охлажденіемъ въ періодѣ замерзанія и 2) охлажденіемъ ниже температуры періода замерзанія. Условія, при которыхъ происходятъ эти явленія, могутъ быть двоякого рода.

Во-первыхъ, возможно себѣ представить, что мы въ состояніи искусственно измѣнить скорость охлажденія по окончаніи періода замерзанія; т. е. что мы можемъ вести охлажденіе медленно въ періодѣ замерзанія и быстро ниже его, или наоборотъ; или же по желанію быстро или медленно въ обоихъ періодахъ.

Въ такихъ случаяхъ мы будемъ имѣть дѣло съ искусственно измѣняемой скоростью охлажденія. Во-вторыхъ, можно себѣ представить, что мы не въ состояніи измѣнить скорости охлажденія. Такъ, напримѣръ, создавъ условія для быстраго охлажденія въ періодѣ замерзанія, мы уже не будемъ въ состояніи измѣнить ихъ и въ послѣдующемъ періодѣ, до тѣхъ поръ, пока масса совершенно не охладится. Такимъ образомъ, охлажденіе и ниже періода замерзанія будетъ сравнительно быстрымъ.

Правда, даже если искусственно и не измѣнять условій охлажденія въ оба эти періода, скорость охлажденія будетъ мѣняться отъ естественныхъ причинъ.

Вниманія заслуживаютъ двѣ естественныя причины, вызывающія измѣненіе въ скорости паденія температуры, а именно:

1) Отдача тепла, начиная съ точки замерзанія, постепенно уменьшается какъ во время замерзанія, такъ и во время дальнѣйшаго охлажденія, вслѣдствіе того, что температура массы постепенно приближается къ температурѣ среды, въ которой происходитъ охлажденіе. Отдача тепла охлаждаемой массой въ окружающую среду уменьшается по мѣрѣ уменьшенія разности ихъ температуръ.

2) Во время замерзанія паденіе температуры замедляется подъ вліяніемъ выдѣленія скрытой теплоты замерзанія. Вслѣдствіе этого, во время замерзанія, температура стѣнокъ сосуда или печи будетъ ниже температуры замерзающей массы. Поэтому, какъ только окончится замерзаніе и выдѣленіе скрытой теплоты, паденіе температуры массы внезапно ускорится.

Подобное замедленіе и послѣдующее ускореніе должны наблюдаться каждый разъ, когда данная масса при охлажденіи проходитъ черезъ температуру или температурный интервалъ, въ которомъ происходятъ какія-либо экзотермическія превращенія. Примѣромъ можетъ служить рекалесценція стали.

Но такого рода измѣненія въ паденіи температуры естественны и очень незначительны по сравненію съ искусственными измѣненіями, которыя мы можемъ вызвать, напримѣръ, слѣдующимъ образомъ. Дадимъ массѣ, надъ которой производится опытъ, чрезвычайно медленно замерзать въ печи, температура которой только на нѣсколько градусовъ разнится отъ температуры замерзанія массы; затѣмъ, какъ только окончится замерзаніе, прежде чѣмъ температура упадетъ на много

градусовъ ниже температуры замерзанія, опустимъ массу, скажемъ, раскаленную до-красна, въ смѣсь льда и соли или другую какую либо охладительную смѣсь.

Этихъ указаній достаточно для выясненія различія между естественными и искусственными измѣненіями въ скорости охлажденія. Разсмотримъ указанныя выше условія охлажденія въ отдѣльности.

92) Случай 1. Скорость охлажденія можетъ быть измѣнена искусственно.—Какая скорость охлажденія въ обоихъ періодахъ должна повести въ этомъ случаѣ къ наименьшей ликваціи? Принимая во вниманіе общую продолжительность охлажденія, вѣроятно, для этого нужно 1) быстрое охлажденіе въ періодѣ замерзанія, чтобы задержать первоначальную ликвацію и 2) медленное охлажденіе во второмъ періодѣ. Правда, быстрое замерзаніе препятствуетъ выравниванію состава путемъ диффузіи; но весьма вѣроятно, что этотъ недостатокъ можетъ быть компенсированъ соотвѣтственно болѣе медленнымъ охлажденіемъ ниже періода замерзанія. Можно также прибѣгнуть къ нагрѣванію сплава при постоянной температурѣ немного ниже температуры періода замерзанія въ теченіе времени, приблизительно соотвѣтствующемъ тому, которое мы выиграли при быстромъ охлажденіи въ первомъ періодѣ.

При этомъ надо принять во вниманіе, что въ періодѣ, слѣдующемъ за періодомъ замерзанія, диффузія, дѣйствіе которой направлено къ выравниванію состава, не будетъ сталкиваться съ противуположнымъ стремленіемъ къ дифференціаціи, обусловливаемымъ процессомъ замерзанія. Такимъ образомъ, для того, чтобы достигнуть минимальной ликваціи, выгоднѣе всего вести замерзаніе быстро, а затѣмъ охлаждать сплавъ очень медленно, или выдерживать его долгое время при постоянной температурѣ нѣсколько ниже точки замерзанія.

Однако, мы не въ состояніи совершенно увѣренно защищать это положеніе, 1) потому, что мы не знаемъ относительной силы факторовъ перваго и второго таблицы 2-й, и 2) потому, что намъ неизвѣстно, насколько понижается скорость диффузіи при переходѣ отъ періода замерзанія даже къ немного ниже лежащей точкѣ.

93) Случай 2. Охлажденіе идетъ естественнымъ путемъ, т. е. скорость его не можетъ быть измѣнена искусственно.—До сихъ поръ мы разсматривали отдѣльно вліяніе скорости охлажденія въ двухъ различныхъ областяхъ температуры: 1) въ періодѣ замерзанія и 2) въ періодѣ между замерзаніемъ эвтектики и полнымъ охлажденіемъ. Для удобства, результаты, къ которымъ привело насъ разсмотрѣніе этого вопроса, сгруппированы въ таблицѣ 2. Въ техникѣ, однако, ввести искусственное измѣненіе скорости охлажденія къ концу періода замерзанія представило бы въ общемъ такія затрудненія, что прибѣгнуть къ этому могли бы заставить только какія либо очень значительныя преимущества, которыхъ было бы возможно достичь этимъ путемъ. Поэтому, въ обоихъ періодахъ охлаждаютъ или быстро или медленно, или съ подходящей промежуточной скоростью, которая позволяетъ избѣгнуть необходимости измѣнять искусствено скорость охлажденія по окончаніи періода замерзанія.

Является вопросъ, какимъ же образомъ выгоднѣе вести естественное охлажденіе, быстро или медленно, для того, чтобы достигнуть наименьшей ликваціи, т. е. наибольшей однородности.

Конечно, медленное охлажденіе должно быть выгоднѣе. Если охлажденіе все время идетъ очень медленно, тогда въ обоихъ періодахъ оно должно вести къ выравниванію состава. Можно было бы думать, что при умѣренной быстротѣ охлажденія въ періодѣ замерзанія будетъ достигаться меньшая однородность, чѣмъ при очень быстромъ. Но, принимая во вниманіе, что положенія первое и второе таблицы 2-й одно другому противоположны, мы приходимъ къ тому заключенію, что вліяніе скорости охлажденія въ періодѣ замерзанія должно быть больше, чѣмъ въ послѣдующемъ періодѣ. Отсюда слѣдуетъ, что быстрое охлажденіе въ обоихъ періодахъ должно вести къ большей ликваціи, чѣмъ медленное. Это было подтверждено опытами Roberts-Austen надъ вліяніемъ скорости охлажденія на ликвацію сплавовъ мѣди съ серебромъ [1]). Всѣ имѣющіяся данныя приводятъ, равнымъ образомъ, къ тому же результату.

На это могутъ возразить, что въ большихъ болванкахъ стали, охлаждающихся медленно, ликвація бываетъ обыкновенно ясно выражена, тогда какъ въ небольшихъ она совсѣмъ

---

[1]) «Proc. Roy. Soc.», 23, стр. 490—493, 1875.

незначительна, или по крайней мѣрѣ ее считаютъ таковой. Отвѣтъ чрезвычайно простъ. Очень возможно, что значительная ликвація вызывается самимъ объемомъ болванки стали, несмотря на медленное ея охлажденіе, такъ какъ дифференціація, происходящая при замерзаніи, можетъ быть уничтожена только при помощи диффузіи. Объясняется это очень легко. Первоначальная неоднородность, вызванная замерзаніемъ, можетъ быть сглажена въ медленно охлаждающейся болванкѣ только путемъ диффузіи. Но большіе размѣры болванки представляютъ очень серьезное препятствіе для того, чтобы диффузія могла идти до конца, потому что для сглаживанія первоначальной неоднородности частички должны перемѣщаться на слишкомъ большое разстояніе.

Однако, видимая незначительность ликваціи въ небольшихъ стальныхъ болванкахъ приводитъ къ очень важному заключенію. Оказывается, что положеніе первое таблицы 2-ой играетъ очень большую роль. Слѣдовало бы ожидать, что въ небольшихъ болванкахъ, вслѣдствіе быстраго охлажденія, ликвація будетъ очень сильна, наблюдается же совсѣмъ противное. Это можно объяснить только тѣмъ, что быстрое охлажденіе въ періодѣ замерзанія ослабляетъ ликвацію, вызывая меньшую первоначальную неоднородность.

Какъ уже указывалось, данное разсужденіе относится только къ сплавамъ, не образующимъ эвтектики. Къ сожалѣнію, имѣющіяся въ распоряженіи данныя, къ которымъ принадлежатъ и данныя о ликваціи стальныхъ болванокъ, относятся къ сплавамъ, образующимъ эвтектику. Понятно, это сильно понижаетъ цѣнность ихъ, какъ доказательствъ.

Въ случаѣ сплавовъ, образующихъ эвтектику, можетъ, однако, присутствовать очень сильный факторъ, дѣйствіе котораго противоположно выравнивающему дѣйствію диффузіи. Каждый такой сплавъ представляетъ собою механическую смѣсь по меньшей мѣрѣ двухъ различныхъ тѣлъ. При медленномъ охлажденіи, частички каждаго изъ этихъ тѣлъ могутъ стремиться слиться между собой, коагулировать. Можно представить себѣ, что одно изъ тѣлъ будетъ въ большей мѣрѣ слѣдовать этому стремленію, чѣмъ другое, и тогда медленное охлажденіе должно повести къ ликваціи. Недостатокъ мѣста не позволяетъ намъ подробнѣе коснуться этого предмета, и мы ограничиваемся

только указаніемъ на данное усложненіе. Считаемъ также необходимымъ предупредить, что всѣ сдѣланные нами выводы относительно вѣроятнаго хода явленій въ сплавахъ, не образующихъ эвтектики, нельзя прилагать къ сплавамъ, ее образующимъ, не принимая въ расчетъ этого дополнительнаго фактора.

Таблица 2.

Періодъ.		Вліяніе скорости охлажденія.		Чтобы ликвація была наименѣе выражена.
Въ періодѣ замерзанія.		При уменьшеніи первоначальной неоднородности.	1) Уменьшается ликвація.	скорость охлажденія должна быть или чрезвычайно велика, или очень мала.
		При задержкѣ диффузіи въ этомъ періодѣ.	2) Увеличивается ликвація.	
Начиная съ конца періода замерзанія и ниже.		При задержкѣ диффузіи въ этомъ періодѣ.	3) Увеличивается ликвація.	скорость охлажденія должна быть очень мала.
Періодъ замерзанія и охлажденія послѣдовательно.	1 случай. Скорость можетъ быть измѣнена искусственно.			—замерзаніе должно происходить очень быстро, дальнѣйшее же охлажденіе медленно.
	2 случай. Естественная скорость.			должно происходить медленное охлажденіе.

94) Другіе виды роста отложеній.—Въ § 78 мы видѣли, что помимо роста отложеній въ видѣ елочекъ, наблюдается также ростъ ихъ, напр. въ видѣ кубовъ, листочковъ и т. п.

Въ настоящемъ изслѣдованіи (§§ 78—94) однако, чтобы не усложнять дѣла, мы исключительно имѣли въ виду отложенія по типу елочки съ широкими вѣтвями.

Насъ завело бы слишкомъ далеко, если бы мы пожелали убѣдиться въ томъ, насколько справедливы заключенія, къ которымъ мы пришли, по отношенію къ указаннымъ инымъ формамъ роста отложеній. Въ видѣ общаго положенія можно сказать, что, конечно, въ зависимости отъ формы роста отложеній, замыкающій типъ замерзанія, равно какъ и вызываемыя имъ послѣдствія, будутъ болѣе или менѣе сильно выражены. Но это не скажется на тѣхъ выводахъ, къ которымъ мы выше пришли, ибо они основаны на томъ предположеніи, что отложеніе всегда идетъ частью по замыкающему, частью по луковичному типу. Повидимому, не подлежитъ сомнѣнію, что, какъ бы ни шло отложеніе, должны одновременно проявляться оба типа замерзанія.

95) Диффузія идетъ въ обѣ стороны отъ береговой линіи. Замѣтимъ, что диффузія одновременно идетъ въ обоихъ направленіяхъ — въ сторону материка изъ берегового слоя и въ сторону незамерзшаго открытаго моря изъ прибрежной полосы. На диффузію въ сторону материка мы указывали въ § 84, въ сторону же моря — въ §§ 82 и 89.

96) Скорость замерзанія и послѣдующаго охлажденія можетъ вліять на положеніе кажущихся границъ области сплавовъ, образующихъ эвтектику.—На рис. 33 ординаты, проходящія черезъ точки a и c, даютъ составъ двухъ сплавовъ, ограничивающихъ область сплавовъ, образующихъ эвтектику (§ 67). Согласно опредѣленію, сплавы налѣво отъ точки a, по охлажденіи, представляютъ собой твердый растворъ висмута въ оловѣ; направо отъ точки c—твердый растворъ олова въ висмутѣ. Сплавы между a и c содержатъ, кромѣ твердаго раствора, еще и эвтектику.

Слѣдуетъ, однако, различать нормальное положеніе этихъ границъ отъ кажущагося.

Въ § 71 и 72 мы разсматривали вопросъ, будетъ ли сплавъ двухъ металловъ, обладающихъ ограниченной взаимной растворимостью, какъ, напр., висмута и олова, представлять собой въ состояніи равновѣсія 1) простой твердый растворъ или 2) будетъ онъ обладать также и эвтектикой. Рѣшеніе этого вопроса за-

виситъ единственно отъ количества обоихъ металловъ, входящихъ въ составъ сплава. Нужно знать, достаточно ли, теоретически, количество одного изъ нихъ, чтобы въ твердомъ состоянiи нацѣло растворить другой. Если достаточно, то сплавъ не обладаетъ эвтектикой; если нѣтъ—эвтектика должна образоваться. Это и даетъ намъ положенiе вышеуказанныхъ границъ *a* и *c* при равновѣсiи. *a* и *c* соотвѣтственно, такимъ образомъ, представляютъ олово, насыщенное висмутомъ и висмутъ, насыщенный оловомъ. Къ этому мы еще вернемся въ § 105.

Но, какъ мы уже видѣли, равновѣсiе достигается далеко не всегда, и въ дѣйствительности возможны отклоненiя въ обѣ стороны. Благодаря этому, сплавъ, который при равновѣсiи не долженъ былъ бы содержать эвтектики, можетъ на самомъ дѣлѣ ее содержать, и наоборотъ.

Въ сущности, все это слѣдуетъ изъ предыдущаго. Однако, можетъ быть не безполезно разсмотрѣть оба эти случая—все на томъ же примѣрѣ замерзанiя олова, содержащаго висмутъ.

Мы уже знаемъ, что очень быстрое замерзанiе можетъ, повидимому, повести къ пересыщенiю. Положимъ, что чрезвычайно быстро замерзаетъ сплавъ олова съ висмутомъ, составъ котораго находится слегка направо отъ точки *a*, такъ что при нормальныхъ условiяхъ онъ долженъ былъ бы содержать небольшое количество эвтектики. При этомъ олово испытываетъ пересыщенiе висмутомъ настолько, что оно въ состоянiи удержать послѣднiй нацѣло въ видѣ твердаго раствора. Сплавъ, такимъ образомъ, состоитъ только изъ твердаго раствора висмута въ оловѣ и совершенно лишенъ эвтектики, хотя онъ и долженъ былъ бы ею обладать, если бы не было пересыщенiя.

Обратимся теперь къ противуположному случаю и разсмотримъ сплавъ, составъ котораго находится слегка налѣво отъ *a*; такой сплавъ, при равновѣсiи, не долженъ содержать эвтектики. Положимъ, что условiя замерзанiя были таковы, что избирательный процессъ достигъ нормальной степени и, въ частности, что не было пересыщенiя. Далѣе, положимъ, что къ разсматриваемому моменту окончилось избирательное замерзанiе сплава, и что онъ начинаетъ охлаждаться ниже точки замерзанiя. Въ замерзшей массѣ путемъ диффузiи въ рано отложившiеся слои, бѣдные висмутомъ, переходитъ часть избытка висмута, содержащагося въ болѣе богатыхъ имъ слояхъ позднѣйшаго проис-

хожденія. Диффузія стремится сравнять содержаніе висмута во всей массѣ.

Но предположимъ, что диффузія будетъ настолько понижена при очень быстромъ охлажденіи ниже точки замерзанія, что перейдетъ только очень незначительное количество висмута, и первоначальная неоднородность сплава далеко не будетъ сглажена. При этомъ слои, отложившіеся послѣдними, будутъ богаче висмутомъ, чѣмъ вся масса въ среднемъ. Такъ что, хотя мы и предположили въ настоящемъ случаѣ, что содержаніе висмута во всей массѣ сплава недостаточно для того, чтобы насытить олово, однако его можетъ быть болѣе, чѣмъ достаточно, въ слояхъ, отложившихся послѣдними, и они могутъ оказаться содержащими эвтектику.

Короче говоря, эвтектика можетъ являться въ качествѣ мѣстнаго образованія въ нѣкоторыхъ частяхъ сплава, составъ котораго въ цѣломъ находится внѣ тѣхъ границъ области эвтектики, которыя наблюдаются при равновѣсіи.

Разсмотримъ вопросъ съ другой точки зрѣнія. Мы видѣли въ § 64, что въ томъ случаѣ, когда вымерзающіе слои достигаютъ точки насыщенія ранѣе, чѣмъ замерзнетъ все открытое море, тогда должно образоваться нѣкоторое количество эвтектики. Очевидно, что такимъ путемъ обогащеніе этихъ слоевъ можетъ достигнуть точки насыщенія, хотя въ среднемъ составъ всей массы и будетъ ниже точки насыщенія. Въ этомъ случаѣ, диффузія стремится уничтожить эвтектику. Но очень быстрое охлажденіе задерживаетъ диффузію, и часть эвтектики можетъ остаться.

Итакъ, пересыщеніе можетъ сдвинуть кажущіяся границы эвтектической области, сузить или даже уничтожить ее. Неполная диффузія можетъ раздвинуть эти границы и расширить область эвтектики.

Мы разсматривали здѣсь только вліяніе скорости охлажденія на степень насыщенія и диффузіи. Но, въ общемъ говоря, всякое обстоятельство, вызывающее пересыщеніе, должно тѣмъ самымъ суживать эвтектическую область, всякое же обстоятельство, задерживающее диффузію, должно тѣмъ самымъ эту область расширять.

97) Растворимость падаетъ съ пониженіемъ температуры. Для упрощенія, до сихъ поръ не принималось во вниманіе одно

обстоятельство—а именно то, что способность одного вещества растворять другое, какъ общее правило, обыкновенно увеличивается съ повышенiемъ температуры. Согласно съ этимъ, намъ слѣдовало бы принять, что способность твердаго олова къ растворенiю твердаго висмута должна уменьшаться съ пониженiемъ температуры. Процентное содержанiе висмута въ послѣдовательныхъ твердыхъ слояхъ должно было бы прогрессивно падать въ перiодѣ выдѣленiя насыщенныхъ слоевъ ($B'C$, рис. 31), подъ влiянiемъ непрерывнаго пониженiя температуры, ибо слои должны быть насыщены висмутомъ по отношенiю къ существующей температурѣ[1]. Это, однако, находится въ рѣзкомъ противорѣчiи съ прогрессивнымъ обогащенiемъ висмутомъ слоевъ, отлагающихся въ перiодѣ выдѣленiя ненасыщенныхъ слоевъ. Но эти замѣчанiя тѣмъ не менѣе нисколько не нарушаютъ сдѣланныхъ нами до сихъ поръ выводовъ.

---

[1]) Вслѣдствiе пониженiя точки насыщенiя, слои, насыщенные висмутомъ въ моментъ отложенiя, при дальнѣйшемъ пониженiи температуры оказались бы пересыщенными. Слѣдовало бы выяснить вопросъ, не выдѣляется ли часть избытка висмута въ видѣ мелкихъ зеренъ въ твердомъ металлѣ, и не исчезаетъ ли такимъ путемъ пересыщенiе. Такому выдѣленiю должно было бы способствовать очень долгое выдерживанiе сплава при температурѣ ниже точки замерзанiя (при которой отложившiеся слои и представлялись насыщенными); при этомъ температура должна быть достаточно низка, для того, чтобы пересыщенiе было рѣзко выражено; но въ то же время достаточно высока, чтобы могли идти такiя молекулярныя перемѣщенiя, какъ выдѣленiе избытка висмута изъ раствора и образованiе имъ настолько большихъ частицъ, чтобы ихъ *можно было обнаружить*.

ГЛАВА ПЯТАЯ.

Продолженіе изученія кривыхъ бинарныхъ сплавовъ, не образующихъ химическихъ соединеній.

98) Кривыя насыщенія [1]) или, такъ называемыя, критическія кривыя [2]).—Общія положенія. —Въ дальнѣйшемъ изложеніи этого предмета, отъ § 98 до § 111, мы будемъ всегда принимать, что сплавъ находится въ состояніи равновѣсія, и что отсутствуютъ всякаго рода осложненія, въ родѣ переохлажденія, пересыщенія и т. п.

Для того, чтобы выяснить, что понимается подъ кривой насыщенія, разсмотримъ случай сплава двухъ металловъ, не образующихъ между собой химическаго соединенія. Извѣстно, что двѣ жидкости могутъ взаимно растворяться или во всѣхъ отношеніяхъ или, въ нѣкоторыхъ случаяхъ, только до извѣстнаго предѣла. То же самое можно сказать и относительно нѣкоторыхъ расплавленныхъ бинарныхъ сплавовъ. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ расплавленный сплавъ не образуетъ однородной массы по той причинѣ, что металлы входятъ въ составъ его въ такой пропорціи, что ни одинъ изъ нихъ не въ состояніи растворить другой

---

[1]) Въ оригиналѣ «Saturation-point Curve». Прим. переводчика.

[2]) Обыкновенно эти кривыя называются «критическими». Однако, насколько это названіе удачно, вопросъ спорный, ибо не видно, почему взаимную растворимость двухъ металловъ надо скорѣе признавать критическимъ явленіемъ, чѣмъ точки замерзанія ихъ сплавовъ. Предлагаемое названіе «кривыя насыщенія» свободны отъ такого упрека.

нацѣло. Оба металла, поэтому, являются въ видѣ независимыхъ насыщенныхъ растворовъ одного въ другомъ. Эти растворы могутъ быть механически смѣшаны и образовывать эмульсію, но при долгомъ стояніи они имѣютъ стремленіе, какъ въ случаѣ сплавовъ свинца съ цинкомъ, раздѣлиться на два слоя. При этомъ растворъ свинца въ цинкѣ, какъ болѣе легкій, образуетъ верхній слой, растворъ же цинка въ свинцѣ, какъ болѣе тяжелый, нижній слой[1]) (ср. § 73).

Величина абсциссы OD на рис. 43 выражаетъ отношеніе, въ которомъ расплавленный металлъ G растворяется въ расплавленномъ металлѣ O при температурѣ 0, кривая же DF указываетъ на увеличеніе растворимости G въ O при повышеніи температуры. Точно также, отрѣзокъ GE выражаетъ отношеніе, въ

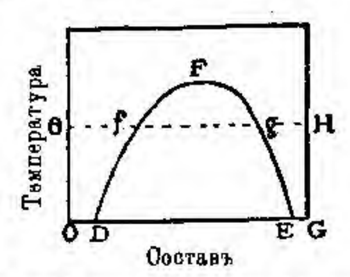


Рис. 43. Кривая насыщенія расплавленнаго бинарнаго сплава.

которомъ металлъ O растворяется въ металлѣ G при температурѣ 0; равнымъ образомъ, кривая EF указываетъ на увеличеніе растворимости O въ G съ повышеніемъ температуры. При данной температурѣ Θ, O можетъ растворить Θf процентовъ G, въ свою очередь G можетъ растворить gH процентовъ O. Слѣдовательно, при этой температурѣ, сплавъ, состоящій изъ металла O съ менѣе чѣмъ Θf процентовъ металла G, представляетъ собой ненасыщенный растворъ G въ O; сплавъ съ Θf процентами представляетъ собой насыщенный растворъ G въ O; при содержаніи менѣе, чѣмъ gH процентовъ металла O, это будетъ ненасыщенный растворъ металла O въ металлѣ G, при gH процентахъ—растворъ насыщенный. Сплавы же между Θf и gH являются смѣсью насыщенныхъ растворовъ, 1) Θf процентовъ G въ O и 2) gH процентовъ O въ G. Сплавы, представленные

[1]) Alder Wright, «Journ. Soc. Chem. Indust.», XI, стр. 492, іюнь 30, 1892.

различными точками на линіи *fg*, будутъ механическими смѣсями этихъ двухъ насыщенныхъ растворовъ въ различныхъ отношеніяхъ.

При *F* обѣ кривыя встрѣчаются, т. е., при этой температурѣ и выше оба металла взаимно растворяются во всѣхъ отношеніяхъ. Вообще, любая точка внѣ *DFE* представляетъ ненасыщенный растворъ одного металла въ другомъ; любая точка на этой кривой представляетъ насыщенный растворъ одного металла въ другомъ, любая точка внутри — механическую смѣсь двухъ насыщенныхъ сплавовъ, 1) *O* насыщеннаго *G* и 2) *G* насыщеннаго *O*,—насыщеннаго, разумѣется, по отношенію къ существующей температурѣ. Въ случаѣ равно-

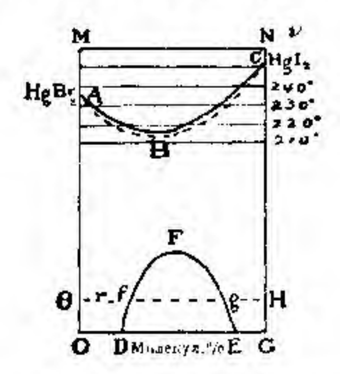


Рис. 44. Кривая насыщенія и кривая замерзанія двубромистой и двуіодистой ртути.

Roberts-Austen и Stansfield, «Rapports Présentés au Congrès International de Physique», I, Paris, 1900, стр. 382; изъ Reinders, «Kon. Akad. von Wetens. te Amsterdam», стр. 146, 1899.

вѣсія, каждый изъ этихъ сплавовъ долженъ быть насыщенъ, какъ было уже указано въ § 73. Именно, мы пришли къ тому заключенію, что «если количество каждаго металла превышаетъ то количество, которое необходимо для насыщенія другого, тогда условіямъ равновѣсія будетъ отвѣчать механическая смѣсь частичекъ обоихъ металловъ, взаимно насыщенныхъ, другими словами, два насыщенныхъ твердыхъ раствора. Очевидно, это справедливо какъ по отношенію къ расплавленному, такъ и твердому состоянію».

99) Кривыя насыщенія металловъ въ твердомъ состояніи. 1) Сплавы, не образующіе эвтектики. Если мы обратимся къ твердому состоянію, то простѣйшимъ случаемъ будетъ

случай двухъ металловъ, которые, какъ золото и серебро, взаимно растворимы во всѣхъ отношеніяхъ при точкѣ замерзанія и даже нѣсколько ниже ея.

Но неограниченная взаимная растворимость двухъ металловъ можетъ при еще болѣе низкой температурѣ стать ограниченной извѣстнымъ предѣломъ, какъ въ случаѣ двуіодистой и двубромистой ртути (рис. 44). Здѣсь приведена кривая замерзанія *ABC* этихъ веществъ. Какъ и раньше, *DF* и *EF* представляютъ растворимость каждаго вещества въ другомъ при температурахъ отъ 0 до *F*. Попрежнему, любая точка внѣ этой кривой (ниже кривой замерзанія) представляетъ ненасыщенный твердый растворъ одного вещества въ другомъ. Любая точка на *DFE* представляетъ насыщенный твердый растворъ. При нормальномъ условіи равновѣсія любая точка внутри *DFE* должна представлять механическую смѣсь двухъ твердыхъ растворовъ, изъ которыхъ одинъ является растворомъ двуіодистой ртути въ двубромистой, другой — двубромистой въ двуіодистой. Каждый растворъ насыщенъ по отношенію къ существующей температурѣ.

Все, что̀ было сказано о расплавленныхъ сплавахъ (§ 98), справедливо также и по отношенію къ твердому состоянію.

Высказанныя соображенія, касающіяся твердыхъ двубромистой и двуіодистой ртути, вполнѣ приложимы также и къ твердымъ сплавамъ любыхъ двухъ металловъ, взаимная растворимость которыхъ, будучи неограниченной при точкѣ замерзанія и даже нѣсколько ниже ея, становится ограниченной при еще болѣе низкихъ температурахъ.

Но только такой сплавъ, при охлажденіи ниже линіи *DFE* (рис. 44), вмѣсто того, чтобы распасться на два твердыхъ раствора, можетъ остаться въ видѣ пересыщеннаго раствора.

Возможно также, что металлъ, служащій растворителемъ, и не будетъ пересыщаться, но начнетъ выдѣлять, будучи уже въ твердомъ состояніи, избытокъ растворенного металла, по мѣрѣ уменьшенія растворимости послѣдняго съ пониженіемъ температуры. Однако частички, въ видѣ которыхъ происходитъ выдѣленіе избытка, могутъ быть настолько малы, благодаря неподвижности твердаго сплава, что ихъ невозможно различить подъ микроскопомъ. Необходимы дальнѣйшія изслѣдованія, которыя пролили бы свѣтъ на этотъ вопросъ.

Положеніе кривой насыщенія при различныхъ условіяхъ и ея отношеніе къ кривой замерзанія.

100) Случай 1. Кривая насыщенія лежитъ ниже кривой замерзанія, т. е. взаимная растворимость не ограничена въ расплавленномъ состояніи при всѣхъ температурахъ, въ твердомъ же состояніи она не ограничена только на извѣстномъ разстояніи ниже точки замерзанія эвтектики, но не при еще болѣе низкихъ температурахъ. Такой случай былъ нами разсмотрѣнъ въ послѣднемъ параграфѣ.

101) Случай 2. Оба металла совершенно взаимно нерастворимы при всѣхъ температурахъ, какъ въ расплавленномъ, такъ и въ твердомъ состояніи. Въ этомъ случаѣ кривая насыщенія совпадаетъ съ осями *OM* и *LN* (рис. 24), какъ ниже, такъ и выше кривыхъ замерзанія.

102) Случай 3. Оба металла совершенно взаимно нерастворимы при всѣхъ температурахъ въ твердомъ состояніи, но взаимно растворимы во всѣхъ отношеніяхъ при любой температурѣ въ расплавленномъ состояніи. Въ этомъ случаѣ кривая насыщенія для твердаго состоянія, какъ и раньше, совпадаетъ съ осями *OM* и *LN* (рис. 24); для расплавленнаго же состоянія она, можно сказать, не существуетъ.

103) Случаи, при которыхъ кривая насыщенія встрѣчается съ кривой замерзанія или пересѣкаетъ ее. Въ трехъ нами разсмотрѣнныхъ случаяхъ (§§ 100—102) взаимная растворимость при температурѣ періода замерзанія какъ въ твердомъ, такъ и въ жидкомъ состояніи или равнялась нулю, или была неограничена. Въ этихъ случаяхъ кривая насыщенія и кривая замерзанія не встрѣчались. Но существуютъ случаи, при которыхъ въ періодѣ замерзанія наблюдается ограниченная взаимная растворимость или въ твердомъ состояніи (случай 4), или въ расплавленномъ состояніи (случай 5), или въ томъ и другомъ состояніяхъ (случай 5β). Въ каждомъ изъ этихъ случаевъ кривая насыщенія встрѣчается съ кривой замерзанія; въ случаѣ 5 кривая замерзанія при этомъ испытываетъ извѣстное измѣненіе, которое зависитъ кромѣ того еще и отъ другихъ побочныхъ условій, какъ будетъ указано въ §§ 107 и 111. Въ таблицѣ 3 указаны эти условія.

Таблица 3.

Въ расплавленномъ состоянiи взаимная растворимость неограничена		Кривая насыщенія пересѣкаетъ обѣ вѣтви V-образной кривой замерзанія	Взаимная растворимость въ твердомъ состоянiи
Случай 4. При всѣхъ температурахъ.			Ограничена.
Случай 5. Только выше извѣстной температуры.		*A*, при одинаковой температурѣ.	α, Нуль (т. е. оба металла въ твердомъ состоянiи совершенно взаимно нерастворимы). β, Ограничена (т. е. оба металла въ твердомъ состоянiи взаимно нѣсколько растворимы).
		B, при различныхъ температурахъ.	α, Нуль. β, Ограничена.

104) Случай 4. Для расплавленнаго состоянія взаимная растворимость не ограничена при всѣхъ температурахъ, но она ограничена для твердаго состоянія при температурѣ періода замерзанія. Въ этомъ случаѣ едва ли можно говорить о кривой насыщенія для расплавленнаго состоянія. Для твердаго же состоянія эта кривая подобна кривой *Daa'* и *Ecc'* на рис. 49. Послѣдняя нанесена только приблизительно, для того, чтобы дать общее понятіе о типѣ этихъ кривыхъ.

105) Въ предыдущемъ и во всѣхъ ему подобныхъ случаяхъ кривая насыщенія проходитъ черезъ нормальныя, или отвѣчающія равновѣсію, границы эвтектической области. Это было уже нами установлено въ § 96. Граница *a* эвтектической области соотвѣтствуетъ составу, при которомъ твердый металлъ *H* насыщенъ твердымъ металломъ *G* (рис. 49) при данной температурѣ, такъ что дальнѣйшее увеличеніе количества металла *G* повело бы къ пересыщенію и къ образованію эвтектики. То же самое mutatis mutandis можно сказать и о точкѣ *c*.

106) Случай 5. Полная взаимная растворимость наступаетъ только выше извѣстной области. Въ этомъ случаѣ кривая насыщенія будетъ расположена выше кривой замерзанія, т. е. она будетъ простираться въ ту часть діаграммы, которая представляетъ расплавленное состояніе. Если извѣстная степень взаимной растворимости наблюдается также и для твердаго состоянія, тогда кривая насыщенія будетъ расположена также и ниже кривой замерзанія. Въ противномъ случаѣ, кривая насыщенія для твердаго состоянія будетъ совпадать съ осями, какъ въ случаѣ 3.

Намъ остается еще разсмотрѣть вліяніе кривой насыщенія на кривую замерзанія въ случаяхъ $5A$ и $5B$. Кромѣ того, надо разсмотрѣть относительное положеніе кривыхъ насыщенія для твердаго и расплавленнаго состоянія. Первому вопросу посвящены §§ 107, 108 и 110, второму § 109.

107) Случай $5A$. Кривая насыщенія пересѣкаетъ обѣ верхнихъ или V-образныхъ вѣтви кривой замерзанія при одной и той же температурѣ [1]. Оба металла въ твердомъ состояніи совершенно взаимно нерастворимы. При этомъ кривыя замерзанія и насыщенія должны имѣть видъ, какъ на рис. 45.

Изслѣдуемъ ходъ кривой $AMJC$, для чего прослѣдимъ замерзаніе трехъ различныхъ сплавовъ, содержащихъ соотвѣтственно R, S и T процентовъ металла G.

1) Сплавъ R. Этотъ сплавъ началъ бы замерзать при температурѣ r, при чемъ сталъ бы затвердѣвать металлъ H, маточный же металлъ началъ бы обогащаться металломъ G, какъ при обычномъ ходѣ избирательнаго замерзанія. Температура и составъ маточнаго металла выразились бы въ послѣдовательные промежутки времени рядомъ точекъ между r и M. Короче говоря, температура и составъ маточнаго металла скользятъ отъ r къ M. Но по достиженіи точки M, этотъ процессъ останавливается, и маточный металлъ далѣе замерзаетъ безъ пониженія

---

[1]) Предположеніе, на которомъ основывается этотъ случай, а именно, что кривая насыщенія пересѣкаетъ обѣ вѣтви кривой замерзанія точно при одной и той же температурѣ, весьма мало вѣроятно и, разсуждая математически, даже едва ли возможно. Этотъ случай можно разсматривать какъ предѣльный. Мы приводимъ его здѣсь потому, что онъ нѣсколько проще, чѣмъ другой случай, при которомъ кривая насыщенія пересѣкаетъ кривую замерзанія при различныхъ температурахъ.

температуры, образуя эвтектику, т. е. распадаясь при замерзанiи на отдѣльныя частички двухъ металловъ, *G* и *H*.

Избирательное замерзанiе прекращается по достиженiи точки *M*, конечно, по той же самой причинѣ, которая вызываетъ замерзанiе эвтектики, какъ одного цѣлаго, въ любомъ сплавѣ, достигшемъ эвтектическаго состава и точки замерзанiя, отвѣчающей послѣднему. Въ каждый данный моментъ во время избирательнаго замерзанiя отъ *r* до *M* маточный металлъ находится при точкѣ замерзанiя, соотвѣтствующей его составу въ этотъ моментъ; не замерзаетъ же онъ нацѣло вслѣдствiе того, что путемъ выдѣленiя части избыточнаго металла, или растворителя, *H*, въ немъ увеличивается концентрацiя растворенняго металла *G*, и такимъ образомъ непрерывно понижается его точка замерзанiи. Этотъ процессъ можетъ продолжаться до тѣхъ поръ, пока избирательное замерзанiе способно привести къ сплаву съ болѣе низкой точкой замерзанiя. Такая возможность исчезаетъ при достиженiи составомъ и температурой маточнаго металла точки *M*, ибо послѣдняя является точкой замерзаiия наиболѣе легкоплавкаго сплава во всей серiи. Очевидно, никакое измѣненiе состава маточнаго металла не можетъ предотвратить замерзанiя. Передвиженiе влѣво только еще болѣе повысило бы его точку плавленiя. Передвиженiе вправо повело бы къ расщепленiю его на механическую смѣсь, состоящую изъ 1) сплава, состава *M* и 2) другого сплава, состава *J*, изъ которыхъ оба не плавятся при этой температурѣ.

2) Сплавъ *S*. По охлажденiи до точки *M*, сплавъ *S* находился бы въ тѣхъ же самыхъ условiяхъ, какъ и маточный металлъ сплава *R* при температурѣ *M*, и замерзъ бы нацѣло.

3) Сплавъ *T*. По охлажденiи ниже точки *F* расплавленный сплавъ расщепляется на два насыщенныхъ раствора: 1) *G* въ *H* и 2) *H* въ *G*. При дальнѣйшемъ охлажденiи составъ послѣднихъ измѣняется, слѣдуя по кривымъ *FM* и *FJ*; по достиженiи температуры *M* составъ этихъ сплавовъ будетъ соотвѣтственно *M* и *J*, а слѣдовательно оба они достигнутъ и точки замерзанiя.

На первый взглядъ казалось бы, что оба эти сплава должны замерзнуть одновременно, потому что каждый изъ нихъ находится при своей точкѣ замерзанiя. Кромѣ того, можно было бы предположить, что при замерзанiи они одновременно расщепятся на отдѣльныя частички металла *G* и металла *H*. Но здѣсь слѣ-

дуетъ замѣтить, что хотя, согласно сдѣланному предположенію, оба расплавленныхъ сплава и обладаютъ одинаковой точкой плавленія, послѣдняя, однако, различна у составляющихъ ихъ металловъ. Можно поэтому предположить, что произойдетъ слѣдующее. Металлъ *G* съ болѣе высокой точкой плавленія начнетъ замерзать предпочтительно предъ металломъ *H*, потому что *G* дальше отстоитъ внизъ отъ точки замерзанія, чѣмъ *H*. Такъ сказать, температурное плечо рычага, выражающаго стремленіе къ замерзанію, больше у *G*, чѣмъ у *H*. Но выдѣленіе нѣкотораго количества металла *G* изъ расплавленной массы, разсматриваемой какъ одно цѣлое, передвинуло бы составъ остальной части этой массы влѣво; это должно было бы вызвать перегруппировку компонентовъ обоихъ расплавленныхъ сплавовъ, въ родѣ описанной въ § 73. По мѣрѣ прогрессивнаго вымерзанія металла *G* количество расплавленнаго сплава *J* должно было бы уменьшаться, сплава же *M*—увеличиваться [1]).

Это должно было бы продолжаться до тѣхъ поръ, пока, вслѣдствіе выдѣленія металла *G* изъ расплавленной массы, остающаяся часть расплавленнаго сплава не достигнетъ состава *M*. Однимъ словомъ, составъ остающагося маточнаго металла долженъ подвигаться влѣво, пока не достигнетъ *M*. Разъ достигнутъ этотъ составъ, дальнѣйшая дифференціація маточнаго металла должна прекратиться. Маточный металлъ состоитъ уже теперь изъ одного компонента *M*, который долженъ замерзать безъ дальнѣйшей дифференціаціи не избирательнымъ путемъ, какъ всякая иная эвтектика; при этомъ онъ расщепляется на чередующіяся частички составляющихъ его металловъ *H* и *G*.

Кривая охлажденія, представляющая такой случай, изображена на рис. 46. Отъ 1 до 2 расплавленный сплавъ охлаждается безъ измѣненія. Они 2 до 3 онъ расщепляется на два насыщенныхъ раствора, составъ которыхъ прогрессивно измѣняется отъ *F* до *M* и отъ *F* до *J* (рис. 45).

---

[1]) Для тѣхъ, кто уже знакомъ съ правиломъ фазъ, можно указать, что на основаніи его должно ожидать описаннаго выше хода явленій при температурѣ *MJ*, а не одновременнаго замерзанія обоихъ металловъ *G* и *H*. При послѣднемъ мы имѣли бы одновременно четыре фазы, расплавленные сплавы *M* и *J* и твердые металлы *H* и *G* при двухъ компонентахъ, тогда какъ при набросанномъ мною ходѣ явленій число фазъ въ каждый данный моментъ не превышаетъ трехъ.

Отъ 3 до 4 металлъ G вымерзаетъ и составъ остающагося маточнаго металла, взятый въ цѣломъ (рис. 45), т. е. какъ среднее изъ двухъ составляющихъ его насыщенныхъ растворовъ, передвигаются налѣво отъ F' къ M.

При 4 дальнѣйшая дифференціація остающагося маточнаго металла прекращается, и отъ 4 до 5 онъ замерзаетъ нацѣло, какъ всякая иная эвтектика, распадаясь при этомъ на чередующіяся частички металла H и металла G.

Отъ 5 до 6 происходитъ охлажденіе твердаго сплава.

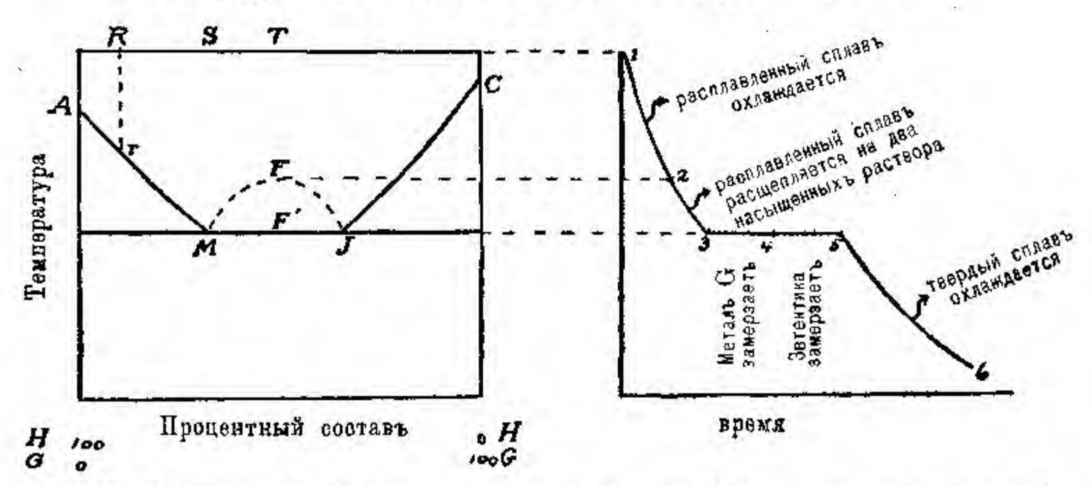


Рис. 45. Кривая замерзанія сплавовъ двухъ металловъ, до извѣстной степени взаимно растворимыхъ въ расплавленномъ состояніи, но совершенно взаимно нерастворимыхъ въ твердомъ состояніи.

Случай 5A: кривая растворимости пересѣкаетъ обѣ верхнихъ вѣтви кривой замерзанія при одинаковой температурѣ.

Рис. 46. Кривая охлажденія сплава T, рис. 45.

Изъ этого можно видѣть, какъ тотъ фактъ, что кривая насыщенія простирается выше кривой замерзанія, вліяетъ на форму послѣдней. Въ частности, въ данномъ случаѣ является срѣзанной вершина V, которую при продолженіи должны были бы образовать линіи AM и CJ, какъ на рис. 24, 27, 28, 33 и 49.

108) Случай 5$A\beta$. Оба металла взаимно нѣсколько растворимы въ твердомъ состояніи. Предположимъ теперь, что оба металла вмѣсто того, чтобы быть взаимно абсолютно нерастворимыми въ твердомъ состояніи, нѣсколько растворимы, но гораздо меньше, чѣмъ въ расплавленномъ состояніи. Это предположеніе дѣлаетъ необходимымъ существованіе кривыхъ насыщенія для твердаго состоянія, но въ то же время оно обусловливаетъ ихъ расположеніе налѣво отъ M и направо отъ J, какъ указано на рис. 47.

Разсмотримъ охлажденіе сплава, первоначальный составъ котораго и температура T. Когда температура его понизится до F, онъ распадется, какъ и въ случаѣ α, на два расплавленныхъ насыщенныхъ раствора, составъ которыхъ, при дальнѣйшемъ охлажденіи, будетъ передвигаться отъ F до M и отъ F до J. По достиженіи температуры MJ произойдетъ то же, что и въ случаѣ α. По мѣрѣ дальнѣйшей потери тепла, система будетъ стремиться замерзнуть, съ образованіемъ твердыхъ сплавовъ f и P.

Но здѣсь, какъ и въ случаѣ α, въ дѣйствительности раньше

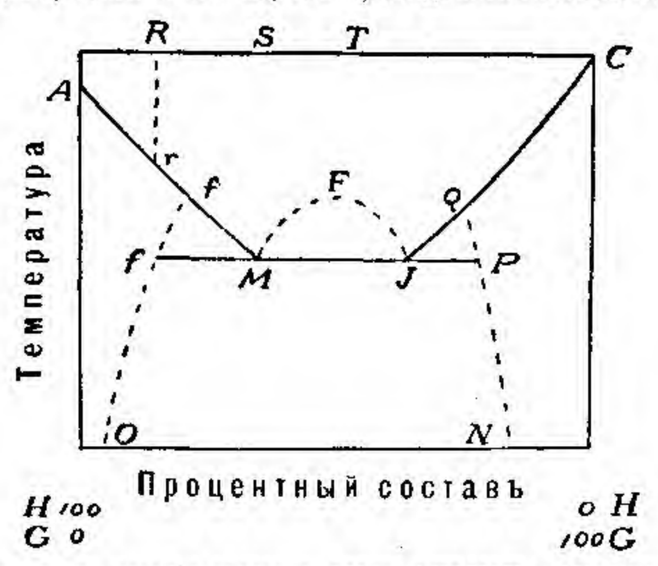


Рис. 47. Кривая замерзанія сплавовъ двухъ металловъ, обладающихъ ограниченной взаимной растворимостью, какъ въ расплавленномъ, такъ и въ твердомъ состояніи.

долженъ начать замерзать сплавъ съ высшей точкой плавленія. Положимъ, что болѣе высокой точкой плавленія обладаетъ сплавъ P и что онъ начинаетъ вымерзать. Вслѣдствіе этого, составъ остающагося расплавленнаго маточнаго металла передвигается влѣво, до тѣхъ поръ, пока, какъ и въ случаѣ α, онъ не достигнетъ M. Иначе говоря, вслѣдствіе перегруппировки компонентовъ маточнаго металла и вымерзанія сплава P, расплавленный сплавъ J совершенно исчезаетъ, и остается только расплавленный сплавъ M. Далѣе сплавъ M замерзаетъ обычнымъ путемъ, какъ и всякая эвтектика, при чемъ расщепляется на чередующіяся частички твердыхъ сплавовъ f и P.

Однимъ словомъ, наблюдаются тѣ же явленія, какъ и въ случаѣ *a*, съ тою только разницей, что первымъ вымерзаетъ не чистый металлъ *G*, но *G*, насыщенный *H*; кромѣ того, по достиженіи маточнымъ металломъ состава *M*, эвтектика, на которую онъ распадается при замерзаніи, состоитъ не изъ чередующихся частичекъ чистыхъ металловъ *H* и *G*, но изъ частичекъ насыщенныхъ растворовъ *G* въ *H* и *H* въ *G*.

109) Относительное расположеніе кривыхъ насыщенія для твердаго и для расплавленнаго состоянія. Относительное расположеніе кривыхъ насыщенія для твердаго и расплавленнаго состоянія должно быть какъ на рис. 47, вслѣдствіе того, что взаимная растворимость металловъ должна быть гораздо меньше для твердаго состоянія, чѣмъ для жидкаго, т. е. кривая насыщенія для твердаго состоянія должна находиться налѣво отъ *M* и направо отъ *J*. Иначе говоря, между этими кривыми для твердаго и расплавленнаго состоянія долженъ быть рѣзкій скачокъ, подобно *f'M* и *QJ*.

110) Случай 5*B*. Кривая насыщенія пересѣкаетъ верхнія или *V*-образныя вѣтви кривой замерзанія при различныхъ температурахъ—*a*. Оба металла взаимно нерастворимы въ твердомъ состояніи. Въ этомъ случаѣ кривая замерзанія принимаетъ своеобразную форму, указанную на рис. 48. Здѣсь верхнія точки замерзанія сплавовъ, содержащихъ отъ 70 до 100% *H*, представлены участкомъ *AM*; содержащихъ же отъ 0 до 20% *H*,—участкомъ *BJ*. Нижнія точки замерзанія этихъ сплавовъ расположены на линіяхъ *DM* и *J'E*. Верхнія точки замерзанія сплавовъ промежуточнаго состава, содержащихъ между 20 и 70% *H*, находятся на *JK'M*, нижнія точки замерзанія на *J'M*.

Для того чтобы это провѣрить, прослѣдимъ ходъ охлажденія нѣсколькихъ сплавовъ, содержащихъ соотвѣтственно *I*, *F*, *T* и *Q* процентовъ металла *G*.

Сплавы *I* и *F*. Форма кривой замерзанія при *M* и налѣво отъ *M* можетъ быть установлена путемъ тѣхъ же соображеній, какъ и соотвѣтствующій участокъ на рис. 45. (См. сплавы *R* и *S* рис. 45).

Сплавъ *T* представляетъ собой расплавленный растворъ *G* въ *H*, который при охлажденіи до кривой насыщенія становится насыщеннымъ, ниже же ея расщепляется на два насы-

щенныхъ расплавленныхъ раствора: 1) на большое количество раствора G въ H и 2) на незначительное количество раствора H въ G. При пониженіи температуры до L сплавъ 1 будетъ содержать L' процентовъ G, растворенныхъ въ $100 - L'$ процентахъ H, сплавъ же 2 будетъ содержать $100 - L''$ процентовъ H, растворенныхъ въ L'' процентахъ G. Когда температура упадетъ до K, сплавъ 1 будетъ содержать K' процентовъ G, растворенныхъ въ $100 - K'$ процентахъ H, сплавъ же 2 будетъ содержать $100 - J$ процентовъ H, растворенныхъ въ J процентахъ G. Короче говоря, составъ этихъ двухъ сплавовъ будетъ

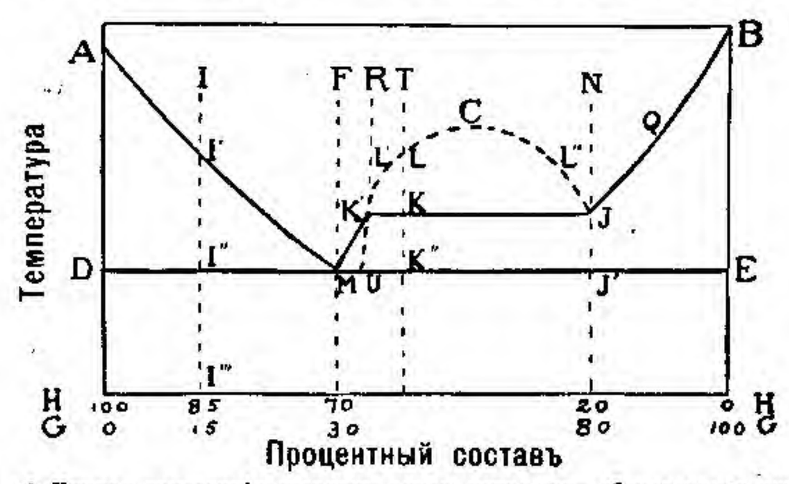


Рис. 48. Кривая замерзанія сплавовъ двухъ металловъ, обладающихъ ограниченной взаимной растворимостью въ расплавленномъ состояніи, но совершенно взаимно нерастворимыхъ въ твердомъ состояніи.

Случай 5в: кривая растворимости пересѣкаетъ верхнія вѣтви кривой замерзанія при различной температурѣ.

соотвѣтственно K' и J. Однако, сплавъ J будетъ теперь находиться при точкѣ замерзанія и при дальнѣйшей потерѣ тепла, но безъ дальнѣйшаго пониженія температуры, начнетъ замерзать.

При замерзаніи изъ сплава J долженъ выдѣляться только металлъ G. Это станетъ совершенно ясно, если мы попытаемся представить себѣ противное. Представимъ себѣ, что сплавъ J выдѣлитъ при замерзаніи при температурѣ J первый кристалликъ не избирательнымъ путемъ, т. е. что составъ этого кристаллика будетъ J. Но кристалликъ долженъ будетъ распасться на частички чистаго металла G и на частички чистаго металла H (при томъ условіи, что равновѣсіе достигнуто), вслѣдствіе полной взаимной нерастворимости металловъ H и G.

Вслѣдъ затѣмъ частички H, находящіяся уже съ самаго момента своего возникновенія подъ дѣйствіемъ сплава K', должны будутъ расплавиться и войти въ составъ послѣдняго. Сплавъ же K' представляетъ собой ничто иное, какъ насыщенный растворъ G въ H. Сплавъ, образовавшійся при раствореніи частичекъ H, будетъ обладать способностью оставаться расплавленнымъ при этой температурѣ, потому что онъ будетъ содержать болѣе K' процентовъ H, иначе говоря, потому что онъ будетъ находиться налѣво отъ K'. Въ результатѣ получились бы два расплавленныхъ сплава—сплавъ J и сплавъ, составъ котораго находится налѣво отъ K'.

Но подъ вліяніемъ того, что составъ маточнаго металла, въ среднемъ, находится между J и K', въ немъ тотчасъ же должна произойти перегруппировка, и должна образоваться механическая смѣсь двухъ сплавовъ, составъ которыхъ J и K' (§ 73). Такимъ образомъ, результатомъ замерзанія и послѣдующаго растворенія при температурѣ J было бы выдѣленіе изъ расплавленной массы небольшого количества металла G и передвиженіе состава маточнаго металла отъ K по направленію къ K'.

Несмотря, однако, на такое измѣненіе состава, маточный металлъ попрежнему будетъ представлять собой механическую смѣсь расплавленныхъ сплавовъ J и K', потому что при температурѣ J таково должно быть строеніе любого маточнаго металла, составъ котораго лежитъ между J и K'. По отношенію къ дальнѣйшему ходу замерзанія, слѣдовательно, условія нисколько не измѣнились по сравненію съ тѣми, когда началъ замерзать первый кристалликъ. Путемъ совершенно такихъ же разсужденій, какъ и раньше, мы приходимъ къ заключенію, что дальнѣйшей ступенью при замерзаніи будетъ опять выдѣленіе изъ маточнаго металла небольшого количества металла G, за которымъ вновь послѣдуетъ перегруппировка остающагося маточнаго металла; благодаря этому въ послѣднемъ уменьшится пропорція сплава J и увеличится пропорція сплава K'. Такимъ образомъ, составъ маточнаго металла передвигается еще на одну ступень влѣво. Прослѣдивъ шагъ за шагомъ дальнѣйшій ходъ этого процесса, мы приходимъ къ тому заключенію, что сущность его состоитъ въ томъ, что металлъ G вымерзаетъ при постоянной температурѣ, и что составъ маточнаго металла постепенно передвигается отъ K къ K'; иными словами, это значитъ, что пропорція

сплава J непрерывно уменьшается, сплава же K' непрерывно увеличивается. Къ тому времени, когда составъ маточнаго металла достигаетъ K', сплавъ J долженъ совершенно исчезнуть, благодаря вымерзанію металла G, и маточный металлъ будетъ состоять исключительно изъ сплава K'. Температура остается постоянной во все время вымерзанія сплава J.

Теперь, разъ въ составъ маточнаго металла входитъ только сплавъ K', дѣло будетъ обстоять въ сущности совершенно такъ же, какъ и въ любомъ случаѣ избирательнаго замерзанія. Напримѣръ, можно провести параллель съ охлажденіемъ сплава состава G (рис. 24) до температуры P. При охлажденіи отъ H до P часть избыточнаго металла (свинца) вымерзаетъ, и составъ остающагося маточнаго металла передвигается подъ вліяніемъ этого отъ H до P. При дальнѣйшемъ паденіи температуры, составъ и температура маточнаго металла передвигаются вдоль линіи PB.

Точно также и въ разсматриваемомъ нами случаѣ (рис. 48) съ дальнѣйшимъ пониженіемъ температуры металлъ G начинаетъ вымерзать; при этомъ вымерзаніе его стоитъ въ такой связи съ паденіемъ температуры, что составъ и температура маточнаго металла все время передвигаются по линіи $K'M$. Въ концѣ концовъ температура и составъ маточнаго металла одновременно достигаютъ эвтектической точки.

При K' маточный металлъ представляетъ собою металлъ H, насыщенный металломъ G. По мѣрѣ того, какъ температура начинаетъ падать ниже K', нѣкоторое количество G начинаетъ вымерзать; благодаря этому, содержаніе G въ маточномъ металлѣ становится меньше, чѣмъ нужно для насыщенія K'. При этомъ принимается, что продолженіе кривой насыщенія $K'U$ наклонено вправо отъ кривой замерзанія $K'M$, какъ это и представлено на рис. 48 [1]).

Но одновременно съ паденіемъ температуры ниже K' понижается также и растворимость G въ H. Для большей простоты предположимъ, что это пониженіе будетъ не настолько

[1]) Уголъ, образуемый линіями $K'M$ и $K'U$, можетъ измѣняться, и даже возможно представить себѣ, что онъ будетъ равенъ нулю, т. е., что $K'M$ совпадетъ съ $K'U$. Въ такомъ случаѣ слѣдуетъ наносить двойную линію, одну сплошную, для обозначенія участка кривой замерзанія, другую же пунктиромъ— для обозначенія участка кривой насыщенія.

значительно, чтобы *G*, содержащагося въ маточномъ металлѣ, оказалось достаточно для насыщенія послѣдняго. Другими словами, кривая замерзанія *K'M* идетъ съ бо́льшимъ наклономъ, чѣмъ продолженіе кривой насыщенія *CK'U*; такимъ образомъ, по мѣрѣ того, какъ температура и составъ маточнаго металла скользятъ по *K'M*, маточный металлъ сперва перестаетъ быть насыщеннымъ *G*, а затѣмъ все болѣе и болѣе становится имъ ненасыщеннымъ. Въ этомъ случаѣ, маточный металлъ за весь конечный періодъ замерзанія представляетъ собой ненасыщенный растворъ, совершенно какъ и на рис. 24.

Можно нанести участокъ *K'U* кривой насыщенія для расплавленнаго состоянія съ цѣлью показать, что онъ дѣйствительно находится направо отъ участка *K'M* кривой замерзанія. Иногда бываетъ возможно опредѣлить участокъ *K'U* при помощи явленій переохлажденія.

Когда температура опустится до *M*, маточный металлъ начнетъ замерзать не избирательнымъ путемъ, какъ и всякая иная эвтектика, по той простой причинѣ, что уже никакой видъ избирательнаго замерзанія нормальнымъ образомъ далѣе не въ состояніи воспрепятствовать полному его замерзанію [1]). При замерзаніи эвтектика распадется на два компонента, чистые металлы *H* и *G*, ибо, согласно сдѣланному предположенію, оба они совершенно взаимно нерастворимы въ твердомъ состояніи.

Такимъ образомъ, первоначальному составу *T* отвѣчаютъ двѣ точки замерзанія *K'* и *K''*. Совершенно то же самое было бы справедливо и по отношенію къ любому сплаву, составъ котораго лежалъ бы между *R* и *N*. Для сплавовъ, составъ которыхъ лежитъ между *R* и *F*, верхняя точка замерзанія будетъ на линіи *K'M*, нижняя же точка замерзанія на линіи *MJ'*.

Это даетъ намъ кривыя замерзанія между *F* и *N*, а именно кривую верхнихъ точекъ замерзанія *MK'J* и нижнихъ *MJ'*.

---

[1]) Легко видѣть, что при *M* замерзаніе должно быть неизбирательнымъ. Избирательное замерзаніе возможно только тогда, когда оно можетъ понизить точку замерзанія маточнаго металла ниже существующей температуры. Это совершенно неосуществимо при помощи вымерзанія части металла *G*, потому при этомъ составъ маточнаго металла передвинулся бы влѣво и точка плавленія его стала бы выше. Точно также и вымерзаніе металла *H* вызвало бы передвиженіе состава маточнаго металла вправо и повышеніе точки плавленія.

Сплавъ Q. Для серіи сплавовъ между N и B верхней вѣтвью кривой замерзанія служитъ $BJK'M$, нижней вѣтвью $J'E$. Возьмемъ, напримѣръ, сплавъ Q. Онъ начинаетъ замерзать избирательнымъ путемъ, выдѣляя избыточный металлъ G, при чемъ составъ и температура маточнаго металла, какъ во всѣхъ подобныхъ случаяхъ, передвигаются отъ Q къ J. Но какъ только температура начнетъ падать ниже J, произойдетъ пересѣченіе кривой, выражающей составъ маточнаго металла съ кривой растворимости. Вслѣдствіе этого маточный металлъ долженъ будетъ распасться на механическую смѣсь двухъ сплавовъ, составъ которыхъ K' и J.

Очевидно, маточный металлъ теперь находится въ тѣхъ же условіяхъ, въ которыхъ находился, по охлажденіи до температуры K, и маточный металлъ, первоначальный составъ котораго былъ T. Точно такъже, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, по мѣрѣ паденія температуры начинаетъ вымерзать металлъ G, а слѣдовательно и составъ маточнаго металла передвигается отъ J къ K'. Затѣмъ, при продолжающемся вымерзаніи G, составъ и температура маточнаго металла передвигаются отъ K' къ M. Наконецъ, при M температура остается постоянной, въ то время какъ маточный металлъ замерзаетъ неизбирательнымъ путемъ, образуя механическую смѣсь эвтектики изъ чередующихся частичекъ чистыхъ металловъ G и H.

Ходъ замерзанія сплавовъ, по составу промежуточныхъ между Q и B, будетъ совершенно одинаковъ съ ходомъ замерзанія сплава Q; въ частности, вторая или нижняя точка замерзанія ихъ будетъ на линіи $DMJ'E$. Иными словами, эта линія будетъ простираться непрерывно до правой стороны діаграммы. Причиной этому служитъ то обстоятельство, что благодаря нерастворимости G въ H въ твердомъ состояніи, когда при охлажденіи до BJ начинается замерзаніе, вымерзаетъ только металлъ G, каковъ бы ни былъ первоначальный составъ сплава.

Въ какомъ бы маломъ количествѣ ни присутствовалъ H, т. е. какъ бы близко налѣво отъ B ни лежалъ, взятый въ цѣломъ, составъ сплава, H будетъ продолжать концентрироваться въ маточномъ металлѣ. Очевидно, что въ то время, когда температура маточнаго металла упадетъ до J, въ немъ будетъ заключаться все количество металла H, входящаго въ составъ сплава. Короче говоря, маточный металлъ будетъ обладать теперь температурой и составомъ J.

Но разъ маточный металлъ имѣетъ этотъ составъ и температуру, онъ долженъ находиться въ тѣхъ же условіяхъ, какъ и сплавъ Q по достиженіи температуры J. При дальнѣйшемъ охлажденіи будутъ повторяться тѣ же явленія, какъ и въ случаѣ сплава Q. Температура расплавленнаго маточнаго металла будетъ оставаться постоянной, въ то время какъ составъ его будетъ постепенно передвигаться отъ J къ K', а затѣмъ температура и составъ его будутъ измѣняться отъ K' до M. Такъ какъ до сихъ поръ шло исключительно вымерзаніе металла G, въ маточномъ металлѣ будетъ заключаться все то же количество металла H.

Такимъ образомъ, какъ бы незначительно ни было количество металла H въ сплавѣ, онъ должно всецѣло войти въ составъ эвтектической смѣси, образующейся при замерзаніи маточнаго металла при M. Иначе говоря, M будетъ представлять собой температуру замерзанія эвтектики, независимо отъ количества металла H, входящаго въ составъ сплава. Поэтому линія, представляющая нижнюю точку замерзанія, должна непрерывно простираться до правой стороны діаграммы.

Сравнивая рис. 45 и 48, мы видимъ, что основнымъ различіемъ между ними служитъ то, что на рис. 45 участокъ JJ' сводится къ нулю.

111) Случай 5$B\beta$. Оба металла взаимно нѣсколько растворимы въ твердомъ состояніи.—Изъ сравненія §§ 107 и 108 и въ особенности рис. 45 и 47 между собой, видно, какъ измѣняется діаграмма, если вмѣсто совершенной взаимной нерастворимости металловъ въ твердомъ состояніи принять, что они взаимно нѣсколько растворимы. При этомъ линія, представляющая точки замерзанія эвтектики, становится короче и не простирается уже черезъ всю діаграмму, а является ограниченной точками f и P; кромѣ того появляются кривыя насыщенія Off' и NPQ. Что касается до процесса замерзанія, то при нѣкоторой взаимной растворимости металловъ въ твердомъ состояніи, онъ отличается тѣмъ, что вымерзаетъ не чистый металлъ H, но металлъ H, насыщенный металломъ G, и это продолжается до тѣхъ поръ, пока маточный металлъ не достигнетъ состава J. Далѣе же, при замерзаніи эвтектики, получается механическая смѣсь, состоящая не изъ чередующихся частичекъ чистыхъ металловъ H и G, но изъ частичекъ H насыщеннаго G и частичекъ G, насыщеннаго H.

Совершенно тѣ же разсужденія приложимы и къ случаю, разсматриваемому въ настоящемъ параграфѣ. Допущеніе нѣкоторой взаимной растворимости въ твердомъ состояніи точно такимъ же образомъ сказалось бы, какъ на видѣ діаграммы, такъ и на ходѣ замерзанія.

112) Опредѣленіе кривыхъ насыщенія для твердаго состоянія.—Хотя опредѣленіе кривыхъ насыщенія для твердаго состоянія и представляетъ большія затрудненія, однако въ нѣкоторыхъ случаяхъ оно возможно съ извѣстной степенью приближенія. Такъ, положимъ, что требуется опредѣлить растворимость θf (рис. 44) G въ O при данной температурѣ θ°. Для этого можно взять очень тонкую полоску O, привести ее въ соприкосновеніе съ избыткомъ G и нагрѣвать при температурѣ θ°. Нагрѣвая въ теченіе различныхъ промежутковъ времени, затѣмъ охлаждая и опредѣляя послѣ каждаго нагрѣванія и охлажденія, сколько процентовъ G было поглощено путемъ диффузіи пластинкой O, можно опредѣлить растворимость G въ O.

Наоборотъ, возможно также опредѣлить, какое количество металла G можетъ удержать металлъ O при θ°. Въ данномъ случаѣ, сплавъ долженъ содержать большее количество G, чѣмъ въ прошломъ опытѣ было поглощено металломъ O, потому что при поглощеніи нельзя перейти предѣла насыщенія θf, вѣрнѣе же всего едва ли даже можно послѣдняго достигнуть. При изслѣдованіи же вопроса, сколько данный металлъ можетъ удержать въ растворѣ другого, вѣроятнѣе всего, что придется имѣть дѣло съ насыщеннымъ или пересыщеннымъ растворомъ, т. е. въ O будетъ заключаться больше G, чѣмъ соотвѣтствуетъ растворимости θf. Опытъ ставится такимъ образомъ, что сплавъ нагрѣвается выше температуры θ° или, даже лучше, выше точки плавленія, затѣмъ охлаждается до температуры θ°, выдерживается при ней продолжительное время и затѣмъ быстро охлаждается въ водѣ, чтобы не измѣнилась концентрація, соотвѣтствующая θ°.

Затѣмъ сплавъ изслѣдуется подъ микроскопомъ, для того, чтобы убѣдиться, не выдѣлился ли избытокъ G въ твердомъ сплавѣ при указанныхъ благопріятныхъ условіяхъ. Если возможно, дѣлается попытка опредѣлить приблизительно количество выдѣлившагося G; при этомъ, однако, слѣдуетъ имѣть въ виду, что въ данномъ случаѣ долженъ выдѣляться не чистый G, но G, насыщенный gH процентами O. Въ томъ случаѣ, когда

замѣчается выдѣленіе нѣкотораго количества G, можно заключить, что процентное содержаніе G въ сплавѣ было больше, чѣмъ θ/; тогда опытъ повторяется съ сплавомъ, содержащимъ меньшее количество G, и т. д.

Въ большинствѣ случаевъ, результаты опытовъ по первому и по второму методу не вполнѣ совпадаютъ. По первому методу, благодаря неполному насыщенію, должны получаться слишкомъ низкіе результаты, по второму же, вслѣдствіе пересыщенія, слишкомъ высокіе. Однако, такимъ путемъ можно, по крайней мѣрѣ, установить границы, между которыми должна лежать истинная точка насыщенія. Едва ли можно надѣяться тѣмъ или другимъ методомъ получить совершенно точные результаты, потому что въ твердомъ и обладающемъ сравнительно низкой температурой сплавѣ приближеніе къ точкѣ насыщенія въ концѣ должно идти съ обѣихъ сторонъ асимптотически или, по крайней мѣрѣ, очень медленно.

113) Опредѣленіе кривыхъ насыщенія для расплавленнаго состоянія.—Можно слѣдующимъ образомъ опредѣлить обѣ точки кривой насыщенія для данной температуры T.

Расплавимъ данные два металла въ какомъ либо сосудѣ подъ предохранительнымъ слоемъ, скажемъ, ціанистаго калія, нагрѣемъ, ихъ до T', значительно выше T, и хорошо перемѣшаемъ. Прежде чѣмъ остановиться на температурѣ T', надо обсудить вопросъ о возможности потерь путемъ улетучиванія. Ни въ коемъ случаѣ температура T' не должна быть близка къ точкѣ кипѣнія одного изъ данныхъ металловъ. Затѣмъ выльемъ смѣшанные металлы въ узкую глиняную трубку дюймовъ 8 длины, предварительно нагрѣтую до температуры T'; трубка должна быть закрыта съ одной стороны, съ другой же плотно закупориваться. Поддерживая температуру T', постараемся встряхиваніемъ смѣшать металлы возможно полнѣе. Хотя едва ли можно надѣяться на то, что удастся взаимно насытить металлы при температурѣ T', однако, по всей вѣроятности, при этой температурѣ каждый изъ нихъ растворитъ достаточное количество другого, чтобы оказаться насыщеннымъ при болѣе низкой температурѣ T.

Охладимъ затѣмъ расплавленную массу, находящуюся въ трубкѣ, до температуры T и будемъ поддерживать эту температуру, скажемъ, въ теченіе восьми или десяти часовъ, или дольше,

если на необходимость этого укажетъ опытъ. Въ томъ случаѣ, если въ каждомъ металлѣ растворилось большее количество другого, чѣмъ соотвѣтствуетъ точкѣ насыщенія при температурѣ T, должно начаться выдѣленіе избытка. Поддерживаніе постоянной температуры T въ теченіе продолжительнаго промежутка времени и имѣетъ цѣлью дать возможность этимъ двумъ сплавамъ образовать двѣ отдѣльныя массы, съ другой же стороны способствовать выдѣленію избытка.

Для поддержанія постоянной температуры можно примѣнить цилиндръ нѣсколько большаго діаметра, чѣмъ глиняная трубка, обернутый платиновой проволокой и нагрѣваемый электрическимъ токомъ. При отсутствіи такого приспособленія можно воспользоваться ванной изъ расплавленнаго свинца или иного металла. Необходимо тщательно слѣдить за тѣмъ, чтобы температура была одинакова въ различныхъ частяхъ трубки, иначе конвекціонные токи могутъ помѣшать распредѣленію частей расплавленной массы по удѣльному вѣсу. Слѣдуетъ также избѣгать всякаго сотрясенія трубки.

Въ томъ случаѣ, если данные металлы подвержены окисленію, слѣдуетъ работать въ возстановительной или, по крайней мѣрѣ, нейтральной атмосферѣ.

Когда уже можно предположить, что раздѣленіе по удѣльному вѣсу окончилось, охладимъ съ возможной быстротой оба конца металлическаго столбика, гдѣ раздѣленіе должно наблюдаться наиболѣе рѣзко, приложивъ къ нимъ, напримѣръ, по куску холоднаго желѣза. Для этой цѣли желѣзо можно предварительно сильно охладить въ охладительной смѣси. Такое быстрое охлажденіе примѣняется для того, чтобы не нарушить медленнымъ охлажденіемъ равновѣсія, установившагося при температурѣ T.

Необходимо озаботиться свободнымъ доступомъ къ концамъ трубки для того, чтобы возможно было привести съ ними въ соприкосновеніе куски желѣза, не вынимая ее изъ печки. Для этой цѣли верхнюю часть можно сдѣлать подвижной, нижнюю же снадбить соотвѣтствующимъ отверстіемъ.

Послѣ того какъ вся масса застынетъ и охладится, изъ обоихъ концовъ высверливаютъ пробы и дѣлаютъ ихъ анализъ, для того, чтобы опредѣлить съ извѣстнымъ приближеніемъ точки насыщенія. Затѣмъ концы изслѣдуются подъ микроскопомъ съ

тою цѣлью, чтобы убѣдиться, выдѣлился ли нацѣло при температурѣ T избытокъ металла, растворившійся при температурѣ T'; такимъ путемъ можно установить приблизительно количество этого избытка и ввести поправку въ непосредственные результаты химическаго анализа.

Описанный выше методъ представляетъ собой видоизмѣненіе метода C. R. Alder Wright[1]).

114) Ходъ избирательнаго замерзанія. Кривая температуры и состава замерзшаго материка во время избирательнаго замерзанія.—Мы уже видѣли, что кривая, выражающая температуру и составъ маточнаго металла во время избирательнаго замерзанія, скажемъ, сплава олова съ висмутомъ, представляетъ собой отрѣзки одной и той же линіи, каковъ бы не былъ первоначальный составъ. Такъ, если расплавленный сплавъ обладаетъ составомъ q'' (рис. 49), эта кривая является отрѣзкомъ линіи AB, начинающимся при q и идущимъ къ B. Для расплавленнаго сплава состава w'' кривая опять таки является отрѣзкомъ той же самой линіи, начинающимся при w и идущимъ равнымъ образомъ къ B. Для любого первоначальнаго состава, такимъ образомъ, кривая температуры и состава маточнаго металла является однимъ изъ отрѣзковъ линіи AB.

Очень просто объясняется, почему эти кривыя температуры и состава представляютъ собой отрѣзки одной линіи. Въ каждый данный моментъ избирательнаго замерзанія (принимая, что существуетъ равновѣсіе) маточный металлъ находится при точкѣ замерзанія. А такъ какъ точка замерзанія, соотвѣтствующая составу маточнаго металла въ данный моментъ, не зависитъ отъ первоначальнаго состава расплавленной массы, то, слѣдовательно, одна и та же точка одновременно представляетъ температуру и составъ маточнаго металла независимо отъ первоначальнаго состава сплава. То же самое можно сказать и относительно любого ряда температуръ, т. е. любого отрѣзка кривой замерзанія.

Въ томъ случаѣ, когда первоначальный составъ двухъ сплавовъ почти одинаковъ, при замерзаніи, часть кривой, выражающей измѣненіе состава маточнаго металла одного сплава, будетъ одновременно представлять собой и часть кривой, выражающей измѣненіе состава маточнаго металла другого сплава.

---

[1]) «Proc. Royal Soc.», XLV, стр. 465 и 471, 1889.

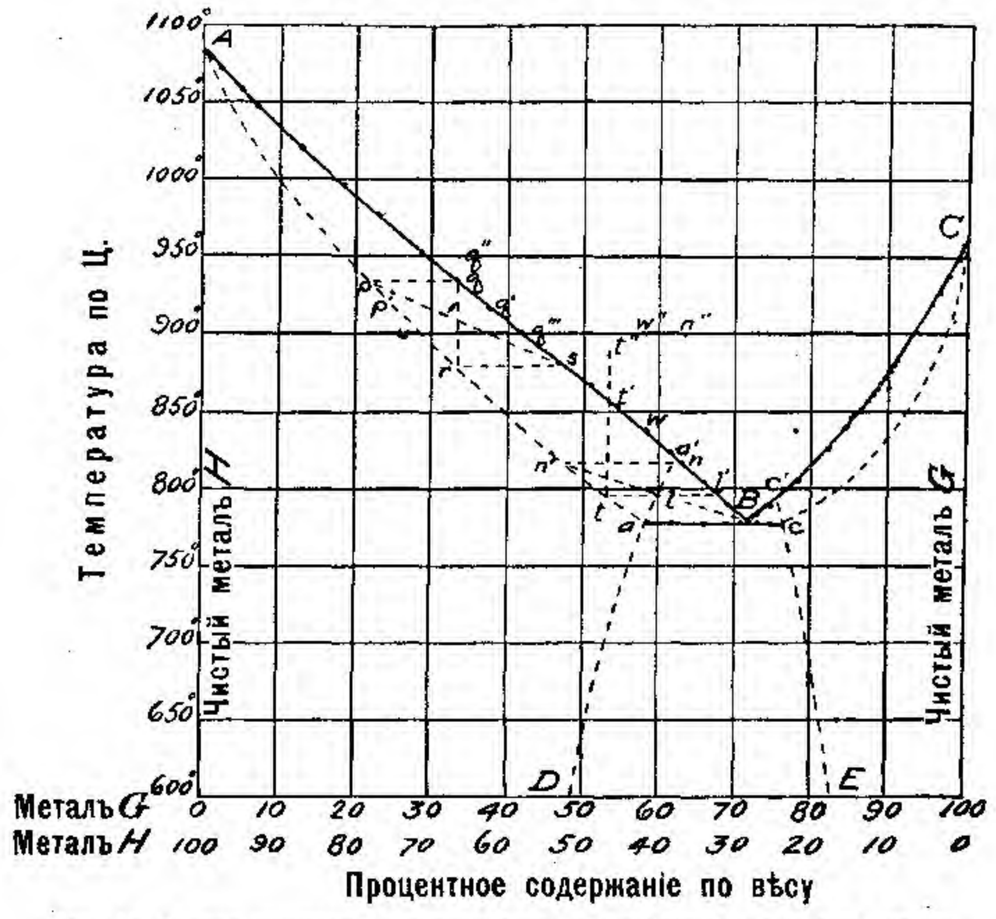


Рис. 49. Кривая замерзанія и другія термическія кривыя, по большей части предположительныя, ряда сплавовъ, средніе члены котораго образуютъ эвтектику.

Кривая *ABCaBc*, въ видѣ курсивнаго *V*, нанесена авторомъ на основаніи данныхъ Heycock и Neville, «Phil. Trans. Roy. Soc.», CLXXXIX, *A*, стр. 33—36, 1897, для кривыхъ замерзанія сплавовъ серебра съ мѣдью. Остальныя, приводимыя здѣсь кривыя вполнѣ предположительны.

На основаніи данныхъ Heycock и Neville, у многихъ возникло представленіе, что эвтектическая область очень мала и ограничена точками *a* и *c*. Авторъ не можетъ указать ни на одинъ рядъ сплавовъ, у котораго эвтектическая область была бы такъ мала. Обыкновенно она распространяется почти поперекъ всей діаграммы. Въ самомъ дѣлѣ, Osmond нашелъ указанія на эвтектику какъ у мѣди, содержащей только 1% серебра, такъ и у серебра, содержащаго только 1% мѣди. Я нашелъ большое количество несомнѣнной эвтектики въ сплавѣ, состоящемъ изъ 3,30% серебра и 96,7% мѣди.

Отсюда слѣдуетъ, что въ той части кривой, которая для нихъ является общей, оба маточныхъ металла при всѣхъ температурахъ должны быть одинаковы по составу; ибо, для каждаго изъ нихъ этотъ составъ является составомъ, для котораго данная температура служитъ точкой замерзанія. По-просту говоря,

эти кривыя совпадаютъ. То же самое можно сказать и относительно каждаго отрѣзка линіи AB. Итакъ, одна и та же линія AB, въ условіяхъ равновѣсія, выражаетъ собой температуру и составъ маточнаго металла во время замерзанія для всѣхъ сплавовъ, первоначальный составъ которыхъ колеблется между A и B. Равнымъ образомъ, линія Aa (рис. 49) выражаетъ собой температуру и составъ уже замерзшей части, замерзшаго матерьяла для всѣхъ сплавовъ, первоначальный составъ которыхъ лежитъ между A и B. Независимо отъ того, каковъ будетъ первоначальный составъ расплавленнаго сплава до начала замерзанія, кривая, выражающая температуру и составъ выпадающей при избирательномъ замерзаніи части, будетъ всегда представлять собой отрѣзокъ этой линіи Aa. Однимъ словомъ, подобно тому, какъ во время избирательнаго замерзанія составъ и температура маточного металла скользятъ вдоль линіи AB къ B, точно также одновременно скользятъ температура и составъ замерзшей части вдоль линіи Aa къ a. Температура замерзшей массы и маточнаго металла должны быть одинаковы, поэтому для каждаго даннаго момента точкой, выражающей температуру и составъ замерзшей части, будетъ точка на линіи Aa, ордината которой равна ординатѣ точки на AB, выражающей составъ расплавленнаго маточнаго металла для того же самаго момента.

Короче говоря, въ каждый данный моментъ точка на Aa, относящаяся къ замерзшей части, должна лежать на одной горизонтальной съ точкой на AB, относящейся къ маточному металлу.

Положимъ на время, что крайними частями кривой, выражающей температуру и составъ твердой части сплава, въ условіяхъ равновѣсія, будутъ Aa для сплавовъ налѣво отъ B и Cc направо отъ B. Въ § 118 мы убѣдимся въ справедливости этого предположенія.

Необходимо помнить, что всѣ наши разсужденія основываются на томъ предположеніи, что мы имѣемъ дѣло съ системами, находящимися въ равновѣсіи.

Въ частности, мы принимаемъ, что температура абсолютно одинакова во всей массѣ, какъ въ твердой, такъ и въ расплавленной ея частяхъ. Далѣе, мы принимаемъ, что неоднородность, вызываемая замерзаніемъ, совершенно сглажена путемъ

диффузіи какъ въ расплавленной, такъ и въ твердой части сплава (рис. 42), и обѣ эти части являются совершенно однородными. Во время замерзанія внѣшніе слои замерзшей части, черезъ которые происходитъ отдача системою тепла, холоднѣе, чѣмъ внутренніе слои, послѣдніе же, въ свою очередь, холоднѣе расплавленнаго маточнаго металла.

Очевидно, что равновѣсія для данной температуры можно достигнуть только въ томъ случаѣ, если поддерживать ее постоянной до тѣхъ поръ, пока не произойдетъ полнаго выравниванія какъ температуры, такъ и состава при помощи диффузіи и теплопроводности; въ расплавленной же части этому способствуютъ еще и конвекціонные токи. Короче говоря, равновѣсіе для данной температуры установится только тогда, когда будетъ совершенно пріостановлено какъ замерзаніе, такъ и отдача системою тепла. Такимъ образомъ, условія равновѣсія при замерзаніи могутъ быть осуществлены только при помощи искусственной его пріостановки.

115) Причины существованія такого рода кривой для твердаго состоянія.—Какимъ образомъ возможно объяснить, что кривая температуры и состава замерзшей части является отрѣзкомъ одной и той же линіи, независимо отъ первоначальнаго состава расплавленнаго сплава? Объясняется это тѣмъ, что при данной температурѣ и составѣ расплавленнаго маточнаго металла, замерзшая часть можетъ обладать только одной опредѣленной температурой и составомъ, при томъ предположеніи, что послѣдняя находится въ равновѣсіи съ маточнымъ металломъ.

При равновѣсіи, очевидно, температура обѣихъ частей всегда должна быть одинаковой, потому что, если бы она была различной, начался бы быстрый переходъ тепла отъ болѣе теплой къ болѣе холодной части, и это продолжалось бы до тѣхъ поръ, пока не установилось бы равенство температуръ. Отсюда можно заключить, что въ каждый данный моментъ во время замерзанія точка, выражающая температуру и составъ замерзшей части, должна находиться на одной горизонтальной съ точкой, выражающей температуру и составъ маточнаго металла.

Теперь мы знаемъ, что кривая, выражающая температуру и составъ маточнаго металла во время замерзанія, является отрѣзкомъ одной и той же линіи AB или CB, независимо отъ

первоначальнаго состава сплава; а также что любой точкѣ на кривой AB или CB можетъ соотвѣтствовать только одна точка, представляющая температуру и составъ замерзшей части, находящейся въ равновѣсіи съ маточнымъ металломъ, независимо отъ первоначальнаго состава сплава. Отсюда слѣдуетъ, что возможенъ только одинъ рядъ точекъ, т. е. одна линія, которая выражаетъ при равновѣсіи температуру и составъ замерзшей части. Возможна только одна линія, соотвѣтствующая линіи AB для расплавленной части и, равнымъ образомъ, только одна линія, соотвѣтствующая линіи CB. Каково расположеніе этихъ линій, возможно въ каждомъ данномъ случаѣ установить только опытомъ. Но совершенно ясно, что одна изъ линій, выражающихъ составъ и температуру замерзшей части, находящейся въ равновѣсіи съ маточнымъ металломъ, должна находиться гдѣ-либо налѣво отъ AB и другая направо отъ CB.

116) Температура и составъ замерзшей части и маточнаго металла во время избирательнаго замерзанія. Сплавъ, не образующій эвтектики. Металлы G и H.—Прежде всего разсмотримъ опредѣленный случай, а именно сплавъ, состоящій изъ 32% металла G (рис. 49) и 68% металла H. Положимъ, что мы начинаемъ медленно охлаждать этотъ сплавъ съ 950°, q''. Сплавъ начинаетъ замерзать, когда температура понижается до q (скажемъ, 933°), при чемъ слой, вымерзающій первымъ, имѣетъ составъ p, на одной горизонтальной съ q (p соотвѣтствуетъ приблизительно 22% G и 78% H). Мы можемъ принимать количество металловъ, входящихъ въ составъ первой вымерзшей частички, настолько малымъ, насколько это допускаетъ величина самыхъ молекулъ. Количество ето не безконечно мало, но представляетъ собой величину порядка молекулъ. Другими словами, частичку эту можно разсматривать, какъ состоящую изъ наивозможно малаго числа молекулъ, а слѣдовательно совершенно однородную во всей своей массѣ. Что касается до состава замерзшей части, то въ этомъ отношеніи условія равновѣсія *вполнѣ соблюдены*, такъ какъ мы принимаемъ, что она вполнѣ однородна. Если принять однородность температуры, то и остальныя условія равновѣсія будутъ также на лицо. Такимъ образомъ безъ вліянія диффузіи составъ первой вымерзшей частички уже отвѣчаетъ точкѣ p.

Во время дальнѣйшаго пониженія температуры, скажемъ до q' (918°), выдѣлится еще цѣлый рядъ слоевъ, изъ которыхъ каждый послѣдующій богаче металломъ G, чѣмъ предыдущій. Будемъ теперь поддерживать постоянную температуру 918° до тѣхъ поръ, пока не окончится диффузія въ этихъ слояхъ, и составъ ихъ не сдѣлается совершенно однороднымъ. Когда это произойдетъ, тогда должно наступить равновѣсіе. При этомъ, какъ уже было указано, составъ замерзшей части будетъ выражаться точкой p', находящейся на одной горизонтальной съ точкой q', отвѣчающей составу остающагося расплавленнаго маточнаго металла, съ которымъ замерзшая часть находится въ соприкосновеніи.

Очевидно, когда сплавъ совершенно затвердѣетъ и сдѣлается во всей своей массѣ путемъ диффузіи однороднымъ, составъ его будетъ одинаковъ съ составомъ расплавленнаго исходнаго сплава. Ибо замерзшій сплавъ есть ничто иное, какъ тотъ же самый исходный сплавъ, съ тою только разницею что послѣдній изъ расплавленнаго состоянія перешелъ въ твердое; исходный же составъ при этомъ не претерпѣлъ никакого измѣненія. Поэтому составъ замерзшаго сплава долженъ лежать на той же ординатѣ, какъ и составъ исходнаго сплава, q'' и q. Вслѣдствіе же полной однородности, затвердѣвшему сплаву должна отвѣчать теперь точка на линіи Aa; такой точкой должна быть точка r, лежащая на одной вертикальной съ q'' и q.

Когда количество маточнаго металла дойдетъ до минимума, передъ тѣмъ какъ замерзнуть послѣдней частичкѣ сплава, остановимъ дальнѣйшее паденіе температуры, въ данный моментъ весьма близкой къ r, и будемъ поддерживать ее постоянной до тѣхъ поръ, пока составъ замерзшей части не сдѣлается совершенно однороднымъ. Послѣдній, согласно вышеизложеннымъ соображеніямъ, будетъ весьма близокъ къ r. Въ силу же того, что точка на AB, отвѣчающая составу маточнаго металла, должна лежать на одной горизонтальной съ точкой на Aa, отвѣчающей составу однородной замерзшей части, составъ замерзающей послѣдней частицы маточнаго металла долженъ выражаться точкой s, лежащей напротивъ r.

Итакъ, температура и составъ маточнаго металла въ началѣ и въ концѣ замерзанія соотвѣтственно q и s, замерзшей же

части—p и r; изъ нихъ p находится на одной горизонтальной съ q, такъ же, какъ и s—съ r; r на одной вертикальной съ q.

117) Сплавъ металловъ G и H, по составу очень близкій къ эвтектическому.—Разсмотримъ далѣе ходъ охлажденія сплава состава w''. Точка w'' лежитъ на одной ординатѣ съ точкой a. Но точка a представляетъ собой границу области сплавовъ, образующихъ эвтектику. Иными словами, точка a представляетъ металлъ H, насыщенный въ твердомъ состояніи металломъ G. Большее содержаніе металла G въ расплавленномъ сплавѣ (независимо отъ того, какъ бы ни былъ малъ этотъ избытокъ) должно было бы при замерзаніи повести къ пересыщенію металла H; а слѣдовательно, во время избирательнаго замерзанія вымерзающіе слои достигли бы точки насыщенія металломъ H раньше, чѣмъ успѣетъ надѣло замерзнуть маточный металлъ. Это должно было бы повести къ расщепленію остающейся части маточнаго металла и къ образованію эвтектики (см. § 64). Однимъ словомъ, сплавъ состава w'' точно граничитъ съ сплавами, образующими эвтектику.

118) Положеніе крайнихъ точекъ кривой, выражающей температуру и составъ замерзшей части.—Температурой, при которой оканчивается замерзаніе въ случаѣ сплава образующаго эвтектику, а также сплава, граничащаго по составу съ областью сплавовъ, образующихъ эвтектику, является точка замерзанія эвтектики, черезъ которую проходитъ линія aBc. Такой сплавъ, граничащій съ данной областью, можно назвать пограничнымъ сплавомъ. Дадимъ такому сплаву замерзнуть, выдержавъ его при постоянной температурѣ, соотвѣтствующей его нижней точкѣ замерзанія, до тѣхъ поръ, пока не окончится диффузія и не установится равновѣсіе. Составъ и температура его будутъ выражаться точкой a, на кривой, относящейся къ замерзшей части сплава. Слѣдовательно, точка a, представляющая собой границу области сплавовъ, образующихъ эвтектику, и одновременно точку замерзанія эвтектики, является одной изъ крайнихъ точекъ кривой, выражающей температуру и составъ замерзшей части.

Очевидно, другой крайней, точкой будетъ A. Ибо, если расплавленная масса представляетъ собой не сплавъ, а попросту чистый металлъ H, тогда замерзаніе не можетъ идти избирательнымъ путемъ. Во все время замерзанія какъ маточный металлъ,

такъ и замерзшая часть состоятъ изъ чистаго металла *H*. Точно также во все время замерзанія температура остается равной *A*. Въ условіяхъ равновѣсія, при замерзаніи, эта точка *A* выражаетъ собой какъ температуру, такъ и составъ, одновременно, маточнаго металла и замерзшей части.

Точно также, *C* и *c* являются крайними точками той же кривой для сплавовъ, лежащихъ направо отъ *B*.

119) Сплавъ металловъ *G* и *H*, образующій эвтектику.— Прослѣдимъ теперь охлажденіе съ 900° сплава, состоящаго изъ 37% металла *H* и 63% металла *G*. Данному составу соотвѣтствуетъ точка *n''*. Когда сплавъ при охлажденіи достигнетъ температуры *n*, скажемъ 818°, начнется замерзаніе, и первая вымерзшая частичка будетъ имѣть составъ *n'*. Точка *n'* лежитъ на кривой *Aa*, на одной горизонтальной съ точкой *n*, и отвѣчаетъ 52% *H* и 48% *G*.

По мѣрѣ дальнѣйшаго хода замерзанія, составъ замерзшей части будетъ скользить вдоль *Aa* отъ *n'* къ *a* (при этомъ принимается, что составъ ея однороденъ благодаря диффузіи), составъ же маточнаго металла вдоль *AB* отъ *n* къ *B*. Когда температура достигнетъ *B*, составъ замерзшей части будетъ *a* (42% *H* и 58% *G*), составъ же остающагося маточнаго металла *B* (28% *H* и 72% *G*).

Такъ какъ замерзшая масса въ этотъ моментъ содержитъ только 58% *G*, *a*, исходная же масса содержала 63% *G*, *n*, то, очевидно, разницу между этими количествами можно отнести на счетъ существованія значительнаго количества маточнаго металла. Далѣе начинается періодъ замерзанія эвтектики.

До сего времени замерзаніе было избирательнымъ, т. е. вымерзающіе слои были болѣе богаты металломъ *H*, чѣмъ маточный металлъ, изъ котораго они вымерзали. Такимъ образомъ, маточный металлъ обогащался металломъ *G*, а слѣдовательно и точка замерзанія его понижалась. Но въ этой точкѣ замерзаніе перестаетъ быть избирательнымъ, потому что, какъ было уже указано, маточный металлъ достигаетъ состава, которому отвѣчаетъ низшая точка замерзанія. Поэтому остальной маточный металлъ замерзаетъ не избирательнымъ путемъ, расщепляясь на механическую смѣсь отдѣльныхъ частицъ *G*, насыщенныхъ *H*, и частицъ *H*, насыщенныхъ *G*.

Вслѣдствіе того, что маточный металлъ обладаетъ эвтектическимъ составомъ, механическая смѣсь, образующаяся при его расщепленіи, будетъ истинной эвтектикой (§ 74). Такимъ образомъ, въ составъ механической смѣси входятъ три тѣла: 1) избыточный металлъ *H*, насыщенный *G*, который вымерзъ въ теченіе предыдущаго періода (насыщенный—потому что мы принимаемъ, что равновѣсіе достигнуто); 2) частички металла *H*, входящаго въ составъ эвтектики, также насыщеннаго *G* (§ 74); и 3) частички металла *G*, образующаго остальную часть эвтектики и насыщеннаго *H*. Несомнѣнно 1) и 2) не могутъ диффундировать одинъ въ другой или реагировать между собой какимъ либо инымъ образомъ, потому что они совершенно одинаковы; 3) не можетъ диффундировать ни въ 1), ни во 2) по причинамъ, изложеннымъ въ § 73. Слѣдовательно, эвтектика, образующаяся при замерзаніи и расщепленіи маточнаго металла при температурѣ *B*, остается какъ таковая и не можетъ быть поглощена частью сплава, вымерзшей ранѣе ея. Конечно, мы предполагаемъ при этомъ, что послѣдняя достигла полной однородности путемъ диффузіи.

Тотъ фактъ, что составъ маточнаго металла въ конечномъ періодѣ замерзанія остается постояннымъ, обусловливаетъ въ этомъ періодѣ и постоянство температуры. Поэтому данный періодъ замерзанія и является представленнымъ точкой *B*.

Въ періодѣ замерзанія эвтектики механическая смѣсь, которую собою представляетъ теперь замерзшая часть, состоитъ изъ постояннаго количества насыщеннаго твердаго раствора *G* въ *H*, образовавшагося въ періодъ вымерзанія избыточнаго металла и обозначаемаго нами выше 1), и изъ прогрессивно увеличивающагося количества эвтектики.

120) Итогъ предыдущихъ соображеній. Подводя итогъ всему вышесказанному, можно сказать, что точками, выражающими температуру и составъ на рис. 49 служатъ:

	Для расплавленнаго металла.	Для замерзшей части.
Во время вымерзанія избыточнаго металла, или образованія твердаго раствора, или періода избирательнаго замерзанія. . .	*AB*	*Aa*
Въ періодъ замерзанія эвтектики.	*B*	*aB*

Въ теченіе перваго періода замерзшая часть становится однородной (при этомъ мы принимаемъ, что диффузія полностью завершается). Въ теченіе же второго она остается въ видѣ механической смѣси, состоящей изъ 1) эвтектики и изъ 2) насыщеннаго твердаго раствора металла *H*, насыщеннаго металломъ *G*. То, что этотъ растворъ насыщенъ, препятствуетъ эвтектикѣ въ него диффундировать.

121) Кривая, выражающая составъ и температуру отлагающихся слоевъ.—На той же самой діаграммѣ мы можемъ графически представить температуру и составъ слоевъ въ моментъ ихъ отложенія, въ отличіе отъ среднихъ температуры и состава всей замерзшей массы въ тотъ же моментъ. Такъ, если исходить по прежнему изъ состава q'', первый отложившійся слой долженъ имѣть составъ *p*. Замерзающая послѣдней частичка маточнаго металла обладаетъ составомъ *s*. Но слой, который замерзаетъ послѣднимъ, долженъ также обладать составомъ *s*, такъ какъ онъ происходитъ изъ послѣдней частички маточнаго металла. Отсюда слѣдуетъ, что составъ послѣдовательно вымерзающихъ слоевъ долженъ выражаться линіей *ps*. Относительно формы этой кривой, однако, мы ничего не можемъ сказать. Очевидно, *ps* соотвѣтствуетъ участку *BC* рис. 30.

Слѣдуетъ обратить вниманіе на коренную разницу между этими кривыми и кривыми температуры и состава *AB*, *CB*, *Aa*, *Cc*, *aBc*. Каждая изъ послѣднихъ пяти кривыхъ относится къ цѣлому ряду исходныхъ составовъ, при чемъ кривая для каждаго состава является только отдѣльнымъ отрѣзкомъ одной изъ данныхъ пяти кривыхъ. Для выраженія же температуры и состава замерзающихъ слоевъ мы имѣемъ для каждаго исходнаго состава отдѣльную кривую.

122) Та же кривая для сплава, образующаго эвтектику.—Въ случаѣ сплава, настолько богатаго металломъ *G*, что онъ будетъ образовывать эвтектику, скажемъ, въ случаѣ сплава съ исходнымъ составомъ n'', первый вымерзшій слой будетъ по прежнему обладать составомъ n'. Слой, замерзающій послѣднимъ, будетъ обладать эвтектическимъ составомъ *B*. Но мѣстомъ точекъ, выражающихъ составъ и температуру слоевъ, уже не будетъ простая линія *nlB*, какъ въ случаѣ не образующаго эвтектики сплава *q*. По мѣрѣ паденія температуры составъ, конечно, долженъ скользить вдоль $n'B$, но по встрѣчѣ съ кривой насы-

щенія Daa' въ точкѣ l дальнѣйшее обогащеніе отлагающихся слоевъ должно прекратиться, потому что они уже теперь являются насыщенными металломъ G (см. § 66). Съ дальнѣйшимъ паденіемъ температуры составъ ихъ долженъ скользить вдоль линіи la, до тѣхъ, поръ пока онъ не достигнетъ точки a; одновременно маточный металлъ достигнетъ эвтектическаго состава и точки замерзанія B. Далѣе уже будетъ вымерзать чистая эвтектика. Такимъ образомъ, точки, выражающія температуру и составъ вымерзающихъ слоевъ, расположены 1) отъ n' до l, 2) отъ l до a и 3) въ B. Переходъ отъ n' черезъ l къ a совершается постепенно, отъ a до B скачкомъ. Этимъ и объясняется то, что подъ микроскопомъ наблюдается такое рѣзкое отграниченіе эвтектики.

123) Соотвѣтствіе между кривой охлажденія и кривой, выражающей температуру и составъ вымерзающихъ слоевъ.— Если мы обратимся къ рис. 31, то увидимъ, для даннаго исходнаго состава n'', слѣдующее соотвѣтствіе съ рис. 49:

Періодъ вымерзанія избыточнаго вещества:	Рис. 31.	Рис. 49.
Вымерзаніе ненасыщенныхъ слоевъ . . .	BB'	$n'l$
Вымерзаніе насыщенныхъ слоевъ	$B'C$	la
Періодъ замерзанія эвтектики	CD	B.

124) Отсутствіе разрыва въ кривой насыщенія.—Изъ того факта, что между нижней границей области расплавленныхъ сплавовъ, которой служитъ кривая замерзанія ABC (рис. 50), и верхней границей области замерзшихъ сплавовъ, $AaBcC$, находятся два разрыва—треугольники AaB и CcB,—можно было бы на первый взглядъ предположить, что послѣдніе представляютъ собой какъ бы нейтральную территорію; что они не относятся ни къ расплавленному, ни къ твердому состоянію. Отсюда можно было бы сдѣлать заключеніе, что кривыя насыщенія для твердаго состоянія должны простираться только отъ D до a и отъ E до c, и что отрѣзки aa' и cc' не имѣютъ реальнаго значенія. Поэтому, казалось бы. послѣднихъ не слѣдовало бы и наносить на діаграмму, такъ какъ изображеніе кривыхъ, выражающихъ свойства несуществующихъ веществъ, можетъ повести только къ недоразумѣнію.

Но это ошибочно. Ошибка коренится въ томъ, что, разсуждая такимъ образомъ, мы упускаемъ изъ виду, что $AaBcC$ является границей области твердаго состоянія только при томъ предположеніи, что твердое вещество достигло полной однородности путемъ диффузіи. Но въ то время, когда идетъ диффузія, сплавы, соотвѣтствующіе этимъ треугольникамъ, временно возникаютъ, и, несмотря на кратковременность своего существованія, обладаютъ извѣстной способностью къ растворенію совершенно такъ же, какъ если бы они были постоянны. Поэтому-то мы имѣемъ полное право наносить участки aa' и cc' въ предѣлахъ этихъ треугольниковъ. Ошибка, слѣдовательно, наша состояла въ

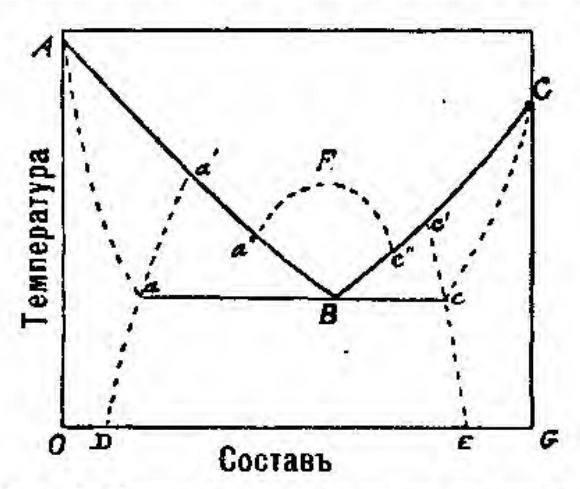


Рис. 50. Кривая замерзанія и кривая насыщенія.

томъ, что мы не принимали во вниманіе существованія этихъ сплавовъ, вслѣдствіе того, что они возникаютъ на чрезвычайно короткое время.

Что эти сплавы существуютъ, можно сдѣлать совершенно очевиднымъ, если припомнить ходъ замерзанія сплава, скажемъ, состава q'' (рис. 49). Положимъ, что незамерзшимъ остается только самая незначительная частичка маточнаго металла, и что установилось полное равновѣсіе.

Мы уже видѣли, что въ этомъ случаѣ составъ замерзшей части весьма близокъ къ r, расплавленнаго же маточнаго металла къ s. Теперь, предположимъ, что благодаря дальнѣйшей потерѣ системою тепла, эта послѣдняя частичка маточнаго металла, обладающая составомъ s, отложится на ранѣе замерзшей твердой

части, состава r. Тотчасъ же избытокъ металла G надъ r изъ этого отложившагося послѣднимъ слоя начинаетъ диффундировать въ ранѣе его отложившіеся слои и этотъ процессъ (если время и температура позволяютъ) продолжается до тѣхъ поръ, пока составъ всей массы не достигнетъ состава r. Но между тѣмъ моментомъ, когда слой отлагается въ видѣ s, и тѣмъ временемъ, когда путемъ диффузіи онъ достигаетъ состава r, онъ долженъ будетъ пройти черезъ цѣлый рядъ промежуточныхъ составовъ между s и r. Точно такимъ же образомъ можно показать, что любая точка въ треугольникахъ AaB и CcB имѣетъ реальное значеніе, хотя и въ теченіе очень короткаго времени.

Даже треугольники $aa'B$ и $cc'B$ имѣютъ реальное значеніе. Такъ, положимъ, что мы имѣемъ сплавъ, исходный составъ котораго t'' (рис. 49); при томъ условіи, что равновѣсіе установилось, частичка его, замерзающая послѣдней, будетъ обладать составомъ l'. При замерзаніи она распадется на частичку, представляющую собой насыщенный твердый растворъ G въ H, и другую частичку, представляющую собой насыщенный твердый растворъ H въ G (§ 108) (Слѣдуетъ обратить вниманіе на различіе между частичкой, замерзающей послѣдней, взятой въ цѣломъ, и тѣми частичками, на каторыя она въ свою очередь распадается; изъ послѣднихъ, одна представляетъ собой твердый растворъ G въ H, другая—твердый растворъ H въ G). Условимся въ дальнѣйшемъ называть эти частички G и H. Вслѣдствіе того, что застывшая ранѣе этихъ частичекъ часть сплава, находящаяся съ ними въ соприкосновеніи, ненасыщена металломъ G (составъ t), металлъ G начнетъ въ нее диффундировать. Подъ вліяніемъ этого, составъ частички H передвинется влѣво, и она перестанетъ быть насыщенной металломъ G. Мы уже видѣли въ § 108, что любой сплавъ въ предѣлахъ кривой насыщенія долженъ въ условіяхъ равновѣсія состоять изъ отдѣльныхъ частичекъ обоихъ металловъ, и при томъ взаимно насыщенныхъ. Но подъ вліяніемъ того, что частичка H перестаетъ быть насыщенной металломъ G, равновѣсіе между ней и частичкой G, насыщенной металломъ H, нарушается и можетъ быть возстановлено только путемъ новой перегруппировки. Послѣдняя должна опять повести къ образованію двухъ новыхъ насыщенныхъ частичекъ. Результатомъ будетъ уменьшеніе ча-

тички G, вслѣдствіе диффузіи, происшедшей въ болѣе ранніе слои.

Процессъ, поведшій къ переходу металла G изъ частички состава l' въ болѣе ранніе слои, будетъ идти и дальше, а вмѣстѣ съ тѣмъ и составъ всей частички, взятой въ цѣломъ, будетъ передвигаться влѣво. Но частичка будетъ состоять изъ двухъ отдѣльныхъ частей, пока составъ ея не пересѣчетъ aa' въ точкѣ l, когда исчезнетъ совершенно G, содержащій H и останется только H, содержащій G. Въ точкѣ l частичка H будетъ насыщена металломъ G; по мѣрѣ дальнѣйшей диффузіи G, составъ частички передвигается къ t, и она становится ненасыщенной. Наконецъ, она достигаетъ состава t въ тотъ же самый моментъ, когда и болѣе ранніе слои достигаютъ этого же состава, вслѣдствіе полнаго выравниванія процентнаго содержанія металла G во всей ихъ массѣ [1]). Такимъ образомъ, каждая точка между l' и l имѣетъ хотя и кратковременное, но реальное значеніе. Путемъ одинаковыхъ разсужденій мы придемъ къ тому же заключенію и относительно любой иной точки въ треугольникахъ $a'aB$ и $c'cB$.

---

[1]) Одинаковымъ образомъ можно было бы ошибочно предположить, что и участокъ $B'C$ кривой охлажденія, рис. 31, не имѣетъ реальнаго значенія, потому что согласно кривымъ, выражающимъ температуру и составъ замерзшихъ слоевъ, послѣдніе достигаютъ насыщенія только въ тотъ моментъ, когда начинаетъ замерзать эвтектика.

Недоразумѣніе, однако, это вызывается тѣмъ, что не дѣлаютъ различія между составомъ замерзшихъ слоевъ послѣ того, какъ они достигнутъ однородности при помощи диффузіи, и составомъ ихъ во время замерзанія. Дѣло въ томъ, что скорость, съ которой идетъ обогащеніе маточнаго металла, зависитъ отъ состава выдѣляющихся изъ нея слоевъ. Правда, совершенно справедливо, что замерзшіе слои, сдѣлавшіеся однородными при помощи диффузіи, достигаютъ насыщенія въ одно время съ достиженіемъ маточнымъ металломъ эвтектическаго состава и точки замерзанія. Однако, не менѣе справедливо и то, что составъ замерзающихъ слоевъ, который долженъ быть промежуточнымъ между уже замерзшей массой и маточнымъ металломъ, долженъ пересѣчь линію насыщенія Daa', прежде чѣмъ маточный металлъ достигнетъ B (рис. 49).

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

Кривыя охлажденія и кривыя замерзанія серій сплавовъ, содержащихъ опредѣленныя химическія соединенія.

126) Серія, въ которой одинъ изъ сплавовъ представляетъ собой химическое соединеніе.—Примѣръ сплавовъ мѣди съ сурьмой (рис. 51) позволяетъ намъ сдѣлать дальнѣйшій шагъ. Эти два металла образуютъ опредѣленное химическое соединеніе ($Cu_8\ Sb_8$?); представленное ординатой PA'. Такимъ образомъ, серія сплавовъ этихъ двухъ металловъ можетъ быть разбита на двѣ группы—къ одной изъ нихъ принадлежатъ сплавы съ избыткомъ мѣди сверхъ этой пропорціи, къ другой—съ избыткомъ сурьмы.

Если въ избыткѣ мѣдь, какъ въ лѣвой части діаграммы (рис. 51), тогда мы имѣемъ сплавы мѣди съ химическимъ соединеніемъ мѣди съ сурьмой. При избыткѣ же сурьмы, какъ въ правой части той же діаграммы, мы имѣемъ сплавы сурьмы съ химическимъ соединеніемъ мѣди съ сурьмой. Естественно, поэтому, ожидать на кривой замерзанія критической точки, соотвѣтствующей химическому соединенію мѣди съ сурьмой, точно такъ же, какъ и на кривыхъ, выражающихъ другія физическія свойства; ибо, прибавка извѣстнаго количества мѣди къ химическому соединенію мѣди съ сурьмой должна оказывать иное вліяніе, чѣмъ прибавка равнаго количества сурьмы къ тому

же соединенію. Въ данномъ случаѣ, обѣ серіи сплавовъ, какъ мѣди съ соединеніемъ мѣди съ сурьмой, такъ и сурьмы съ соединеніемъ мѣди съ сурьмой, образуютъ эвтектику.

Такимъ образомъ, оказывается, что серія сплавовъ мѣди съ сурьмой, взятая въ цѣломъ, обладаетъ двумя эвтектиками—одной, богатой мѣдью, *B*, другой, богатой сурьмой, *B'*. Но въ

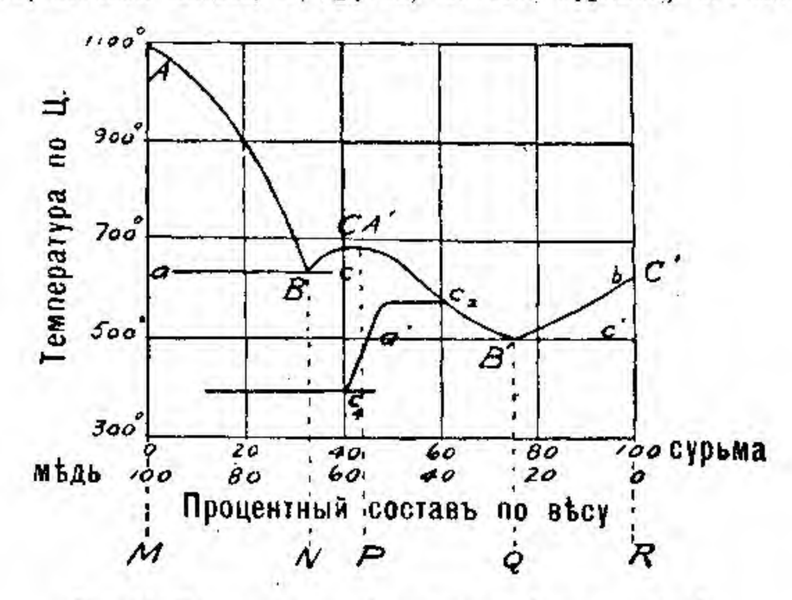


Рис. 51. Кривая замерзанія сплавовъ мѣди съ сурьмой.

Roberts-Austen и Stansfield, Rapports présentés au Congrès International de Physique Réuni à Paris en 1900, I, стр. 394, рис. 19.

любомъ данномъ сплавѣ, конечно, можетъ присутствовать только одна изъ этихъ двухъ эвтектикъ. Сплавы богатые мѣдью—область *aBc*—содержатъ эвтектику *B*, богатую мѣдью; сплавы же богатые сурьмой—область *a'B'c'*—содержатъ эвтектику *B'*, богатую сурьмой (Какъ обычно, мы предполагаемъ, что и въ этомъ случаѣ равновѣсіе установилось).

Если мы возьмемъ для примѣра четыре типичныхъ сплава, съ 20, 38, 60 и 80% сурьмы, то составъ ихъ будетъ слѣдующій [1]).

---

[1]) Roberts-Austen и Stansfield, Rapports présentés au Congrès International de Physique, Réuni à Paris en 1900, I, стр. 394, рис. 19. A. Stansfield, частное сообщеніе 31 января, 1902.

Дальнѣйшее усложненіе въ дѣло вноситъ тотъ фактъ, что нѣкоторые сплавы, богатые мѣдью, испытываютъ послѣ затвердѣванія превращенія, представленныя линіей c_2c_4; для упрощенія, мы оставлемъ безъ вниманія это обстоятельство.

Процентное содержаніе сурьмы.	Эвтектика.	Избыточный металлъ.
20	*B*, Мѣдь и антимонидъ мѣди.	Мѣдь (содержащая въ растворѣ антимонидъ мѣди).
38	*B*, Мѣдь и антимонидъ мѣди.	Антимонидъ мѣди (содержащій въ растворѣ мѣдь).
60	*B'*, Сурьма и антимонидъ мѣди.	Антимонидъ мѣди (содержащій въ растворѣ сурьму).
80	*B'*, Сурьма и антимонидъ мѣди.	Сурьма (содержащая въ растворѣ антимонидъ мѣди).

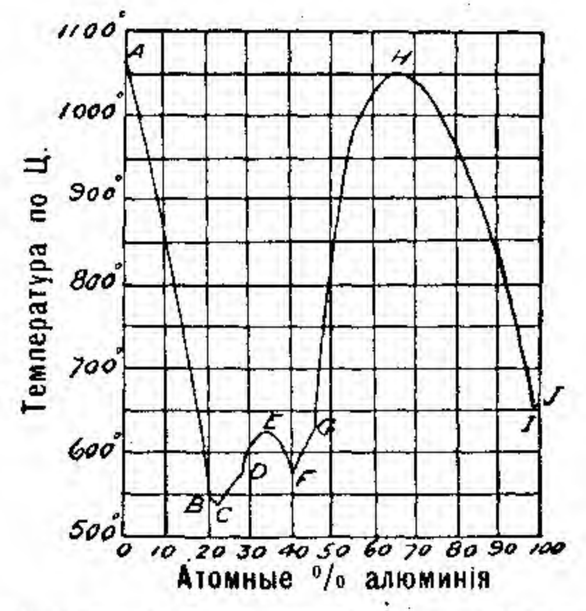


Рис. 52. Кривая замерзанія сплавовъ золота съ алюминіемъ.

Heycock и Neville, Phil. Trans., 194A, стр. 201, 1900.

127) Серія сплавовъ, въ которой нѣсколько членовъ представляютъ собой опредѣленное химическое соединеніе.—Случай сплавовъ золота съ алюминіемъ еще сложнѣе, такъ какъ имѣются указанія на то, что золото съ алюминіемъ образуетъ не менѣе пяти различныхъ опредѣленныхъ химическихъ соединеній. Этимъ и обусловливается сложность ихъ кривой замерзанія, рис. 52. Данные сплавы представляютъ еще особый

интересъ въ томъ отношеніи, что у одного изъ нихъ $AuAl_2$, (H), сплава пурпуроваго цвѣта, открытаго Sir William Roberts-Austen, точка плавленія не только выше средняго ариѳметическаго точекъ плавленія золота и алюминія, но даже весьма близка къ температурѣ плавленія золота[1]).

Кромѣ того, опредѣленное химическое соединеніе двухъ металловъ можетъ само образовать серію сплавовъ, обладающихъ эвтектикой, съ однимъ изъ этихъ металловъ, и серію сплавовъ, лишенныхъ эвтектики, т. е. серію твердыхъ растворовъ, съ другимъ металломъ. Кривая замерзанія первой серіи, занимающая одну часть діаграммы, должна имѣть обычный видъ подчеркнутаго V, тогда какъ кривая замерзанія второй серіи, занимающая другую часть діаграммы, должна идти непрерывно. Такая діаграмма будетъ имѣть видъ изображенной на рис. 53.

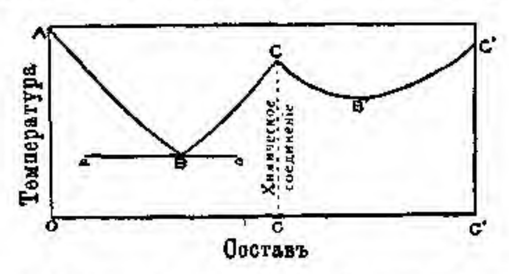


Рис. 53. Предположительная кривая замерзанія ряда сплавовъ, содержащаго опредѣленное химическое соединеніе и обладающаго эвтектикой съ одного конца, тогда какъ съ другого послѣдняя отсутствуетъ.

128) Значеніе выраженія «высшій анализъ» въ приложеніи къ сплавамъ.—Теперь мы видимъ, что̀ имѣлось въ виду, когда мы говорили, что изученіе строенія сплавовъ, напр., при помощи ихъ кривыхъ замерзанія, даетъ намъ методъ высшаго анализа. Такъ, напримѣръ, положимъ, что кто-нибудь опредѣлилъ бы кривыя охлажденія чистаго свинца, чистаго олова и

---

[1]) Преобладаетъ мнѣніе, что точка плавленія сплава всегда ниже средняго ариѳметическаго точекъ плавленія входящихъ въ его составъ металловъ. Однако, это вовсе не необходимо. На самомъ дѣлѣ, нѣкоторые сплавы имѣютъ точку плавленія выше точекъ плавленія составляющихъ ихъ металловъ. Такъ, C. R. Alder Wright сообщилъ въ 1892 г., что въ случаѣ сплавовъ сурьмы съ алюминіемъ «сплавы, составленные въ извѣстной пропорціи, имѣютъ точку плавленія много выше точекъ плавленія какъ сурьмы, такъ и алюминія» («Journ. Soc. Chem. Indus.», XI, 493, 1892).

ихъ сплавовъ, содержащихъ, скажемъ, 20, 50, 70 и 90% олова, и на основанiи ихъ точекъ замерзанiя начертилъ бы кривую замерзанiя этой серiи. Приэтомъ онъ нашелъ бы, что кривая относится къ типу, изображенному на рис. 24. Отсюда уже тотчасъ можно было бы съ извѣстнымъ вѣроятiемъ заключить, что эти металлы образуютъ серiю сплавовъ, въ большей своей части обладающую эвтектикой, а также, что они не вступаютъ между собой въ химическое соединенiе.

Разсмотрѣнiе подобной же серiи сплавовъ золота съ серебромъ даетъ основанiе заключить, что эти металлы образуютъ серiю сплавовъ, представляющихъ собой твердые растворы. Точно также, одного взгляда на кривую замерзанiя сплавовъ мѣди съ сурьмой достаточно для того, чтобы представить себѣ общiй планъ ихъ строенiя, описанный въ § 126.

Въ первыхъ двухъ случаяхъ направленiе вѣтвей *V*-образной кривой дало бы указанiе на приблизительный составъ эвтектики или эвтектикъ, въ третьемъ же случаѣ—на составъ опредѣленнаго соединенiя. Здѣсь, такимъ образомъ, нѣсколько очень несложныхъ наблюденiй даютъ возможность опредѣлить приблизительное положенiе критическихъ точекъ. При дальнѣйшемъ изслѣдованiи приходится сосредоточивать вниманiе на сплавахъ, соотвѣтствующихъ критическимъ точкамъ или близкихъ къ нимъ, такъ какъ всего вѣроятнѣе, что именно эти сплавы должны обладать максимумомъ или минимумомъ различныхъ полезныхъ свойствъ.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

Измѣненіе электропроводности и другихъ свойствъ въ серіяхъ сплавовъ.

129) Электропроводность.—Изъ наблюденій надъ измѣненіемъ другихъ свойствъ въ серіи сплавовъ, напр. электропроводности при комнатной температурѣ, можно также вывести извѣстное заключеніе относительно строенія этихъ сплавовъ. Мы можемъ хотя бы получить кривую, выражающую зависимость электропроводности отъ состава. Но получаемыя такимъ путемъ указанія далеко не столь цѣнны, какъ тѣ, которыя даютъ намъ кривыя охлажденія и замерзанія, т. е. термическое изученіе сплавовъ. Послѣднія даютъ намъ исторію каждаго отдѣльнаго сплава въ широкихъ предѣлахъ температуры и регистрируютъ всѣ происходящія въ немъ за это время измѣненія. Кривая же, выражающая электропроводность и составъ для данной температуры, указываетъ только на электропроводность охлажденнаго сплава, не давая и намека на исторію происхожденія его составляющихъ. При этомъ, если сплавъ обладаетъ сложнымъ строеніемъ, мы получаемъ въ результатѣ среднее изъ электропроводности его составляющихъ.

Однако, изслѣдованіе электропроводности параллельно съ термическимъ изученіемъ сплавовъ можетъ дать очень цѣнные результаты. Методъ этотъ былъ уже примѣненъ Le Chatelier[1]).

---

[1]) Le Chatelier. «Sur la Résistance Electrique des Alliages» (Contribution à l'Etude des Alliages, Commission des Alliages, 1896—1900, стр. 413).

Дѣло заключается въ слѣдующемъ. Вмѣсто того, чтобы просто изслѣдовать электропроводность нѣсколькихъ различныхъ сплавовъ данной серіи, уже охлажденныхъ, прослѣдимъ для каждаго изъ этихъ сплавовъ измѣненіе электропроводности при охлажденіи его отъ расплавленнаго состоянія до обыкновенной температуры. При помощи двухъ регистрирующихъ гальванометровъ, изъ которыхъ одинъ регистрируетъ время и температуру, т. е. наноситъ кривую охлажденія, другой же регистрируетъ одновременно съ первымъ время и электропроводность, мы можемъ получить два ряда указаній относительно возникновенія каждой ихъ составляющихъ сплава; одна кривая будетъ выражать термическій эффектъ, которымъ сопровождается возникновеніе составляющихъ сплава, другая же происходящее при этомъ измѣненіе электропроводности. Затѣмъ эти два ряда кривыхъ можно свести въ одну діаграмму, нанеся ихъ критическія точки и соединивъ послѣднія между собой, совершенно такъ же, какъ и въ случаѣ кривой замерзанія; при этомъ температура отлагается на оси ординатъ, составъ—на оси абсциссъ.

Принципъ такого регистрирующаго приспособленія весьма простъ. Пучекъ свѣта, отражаемый зеркаломъ гальванометра, движется вправо и влѣво въ горизонтальной плоскости, слѣдуя, если гальванометръ указываетъ температуру, измѣненіямъ термоэлектрическаго тока и т. д. Для автоматическаго регистрированія отклонекій гальванометра надо только направить фокусъ этого пучка свѣта на фотографическую пленку, движущуюся въ вертикальной плоскости. Эта пленка можетъ быть навернута на цилиндръ, ось котораго составляетъ прямой уголъ съ пучкомъ свѣта. Но, по моему мнѣнію, лучше прикрѣплять пленку на стеклянную пластинку, поверхность которой перпендикулярна къ пучку свѣта, или, говоря точнѣе, пучку, находящемуся въ положеніи среднемъ между крайними точками его отклоненія. Стеклянная пластинка движется вертикально, и результатомъ этого вертикальнаго движенія и горизонтальнаго движенія пучка свѣта является кривая, напр. кривая охлажденія. Каждый изгибъ такой кривой указываетъ на измѣненіе въ силѣ термо-электрическаго тока, проходящаго черезъ гальванометръ, вызываемое въ свою очередь измѣненіемъ въ скорости охлажденія наблюдаемаго вещества.

Для того, чтобы такимъ путемъ получить результаты близкіе по своей цѣнности къ получаемымъ при помощи термическаго

изученія сплавовъ, необходимо, чтобы опредѣленіе электропроводности захватывало широкіе предѣлы температуры. Оно должно начинаться при температурѣ выше точки замерзанія сплава, простираться на весь періодъ замерзанія и идти до комнатной температуры. Особенно важны наблюденія въ періодѣ замерзанія, такъ какъ именно въ это время возникаетъ большинство составляющихъ. Конечно, не легко опредѣлить элекропроводность расплавленныхъ и замерзающихъ сплавовъ; однако возникающія при этомъ затрудненія не непреодолимы.

130) Термо-электрическія явленія. — Тотъ же самый методъ можно было бы примѣнить съ большимъ удобствомъ и къ изученію термо-электрическихъ явленій. Здѣсь, равно какъ и раньше, при помощи двухъ регистрирующихъ гальванометромъ, можно было бы одновеменно получить 1) кривыя охлажденія, указывающія термическій эффектъ, сопровождающій каждое превращеніе и 2) кривыя, выражающія силу термо-элекрическаго тока и время.

На основаніи этихъ кривыхъ можно построить кривыя, указывающія на вліяніе, оказываемое различными продуктами этихъ превращеній на силу термо-электрическаго тока. Затѣмъ, выразивъ температуру ординатами, составъ же абсциссами, и нанеся критическія точки термо-электрическаго тока, мы получимъ діаграмму, которая можетъ служить для подтвержденія указаній, даваемыхъ кривой замерзанія.

Конечно, значеніе этого метода ограничено тѣмъ обстоятельствомъ, что онъ примѣнимъ только до той температуры, при которой изучаемый сплавъ начинаетъ дѣйствовать химически на металлъ, служащій другимъ членомъ термо-электрической пары. Насколько серьезное значеніе имѣетъ это ограниченіе, остается еще невыясненнымъ. Въ тѣхъ случаяхъ, когда это обстоятельство заставляетъ насъ ограничиваться изученіемъ сплавовъ при температурахъ ниже ихъ нижней точки замерзанія, конечно, это составляетъ большое препятотвіе, такъ какъ исключаетъ возможность изслѣдовать самую важную критическую область.

Но для изученія превращеній, идущихъ въ твердомъ металлѣ гораздо ниже точки замерзанія, какъ въ желѣзѣ и стали, этотъ методъ долженъ имѣть большое значеніе.

Каждый изъ этихъ методовъ обѣщаетъ дать безъ большихъ затрудненій много цѣнныхъ результатовъ.

То же самое можно сказать и относительно коэффиціента расширенія, изученіе котораго привело уже Le Chatelier къ важнымъ выводамъ [1]).

131) Электропроводность при обыкновенной температурѣ.— Возвращаясь вновь къ электропродности охлажденныхъ сплавовъ не лишнее будетъ сказать нѣсколько словъ относительно того, какъ она измѣняется въ зависимости отъ того, къ какому типу принадлежитъ данная серія сплавовъ. Вопросъ этотъ будетъ разсмотрѣнъ въ §§ 132—135.

132) Твердые растворы. Положимъ, что всѣ сплавы данной серіи, напр. золота съ серебромъ, представляютъ собой твердые

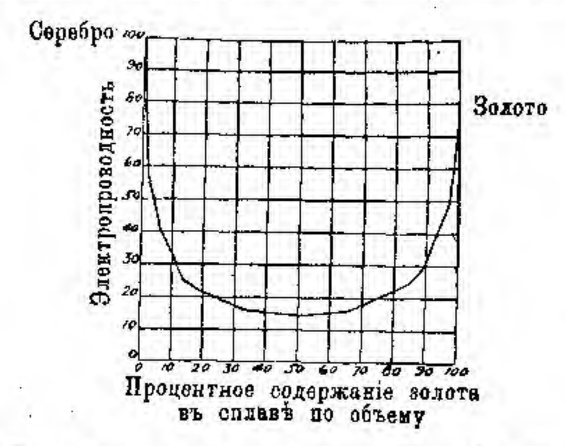


Рис. 54. Кривая электропроводности сплавовъ серебра съ золотомъ.

Matthiessen, «Rept. British Assoc.», XXXIII, стр. 46, табл. V, 1863.

растворы, золота въ серебрѣ или серебра въ золотѣ. Мы знаемъ, что свойства обычныхъ жидкихъ растворовъ измѣняются постепенно, безъ рѣзкихъ скачковъ и критическихъ точекъ, по мѣрѣ увеличенія концентраціи, т. е. по мѣрѣ перехода отъ одного конца серіи къ другому. Вслѣдствіе этого, и въ случаѣ твердыхъ растворовъ слѣдовало бы ожидать, что кривая электропроводности пойдетъ совершенно гладко, безъ перегибовъ или критическихъ точекъ. Справедливость этого предположенія подтверждается изслѣдованіями Matthiessen'a (рис. 54).

[1]) Le Chatelier, «Sur les Propriétés des Alliages». Contribution à l'Etude des Alliages, Commission des Alliages, 1896—1900, стр. 387.

133) Серія сплавовъ, на всемъ своемъ протяженіи обладающая эвтектикой.—Но каковъ будетъ видъ кривой въ случаѣ двухъ металловъ, взаимно абсолютно нерастворимыхъ? Положимъ, что таковыми являются свинецъ и олово. Тогда всѣ сплавы этихъ двухъ металловъ по охлажденіи состояли бы изъ эвтектики и чистаго свинца или чистаго олова, въ зависимости отъ того, который изъ этихъ двухъ присутствовалъ въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи. Сама же эвтектика состояла бы изъ перемежающихся пластинокъ чистаго свинца и чистаго олова. Въ сущности, токъ, проходя черезъ такой сплавъ, долженъ

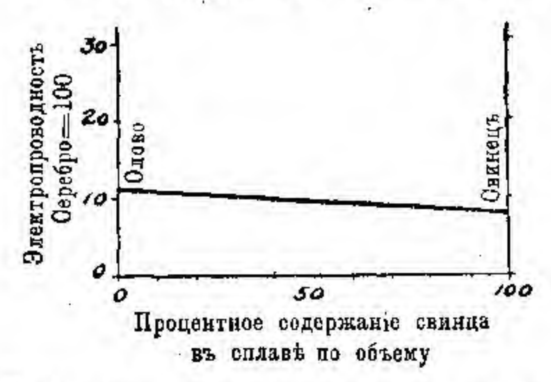


Рис. 55. Кривая электропроводности сплавовъ свинца съ оловомъ.

Matthiessen, «Rept. British Assoc.», XXXIII, стр. 46, табл. V, 1863.

былъ бы проходить просто черезъ механическую смѣсь кристалловъ чистаго свинца и чистаго олова, и если бы между послѣдними не было промежутковъ, тогда общая электропроводность была бы равна среднему изъ электропроводности чистаго свинца и чистаго олова. На это предположеніе нисколько не должно вліять то обстоятельство, что нѣкоторые изъ этихъ кристалловъ сгруппированы въ эвтектику, такъ какъ въ данномъ случаѣ ее можно разсматривать просто какъ механическую смѣсь. Короче говоря, кривая электропроводности должна представлять собой прямую линію, что и было найдено Matthiessen'омъ для сплавовъ свинца съ оловомъ и для нѣкоторыхъ другихъ группъ сплавовъ (рис. 55).

Но кривая электропроводности не можетъ рѣшить вопроса, представляютъ ли собою сплавы твердые растворы или механическія смѣси, развѣ только мы вполнѣ убѣждены, что она

образуетъ совершенно прямую линію; ибо, электропроводность твердыхъ растворовъ двухъ металловъ можетъ отличаться весьма незначительно и даже быть равной среднему изъ электропроводностей этихъ металловъ.

Другими словами, кривая электропроводности серіи сплавовъ, образующихъ твердые растворы, можетъ отличаться весьма мало отъ прямой линіи, и даже можно представить себѣ, что она будетъ представлять прямую линію. Такимъ образомъ, здѣсь нельзя сдѣлать окончательныхъ выводовъ.

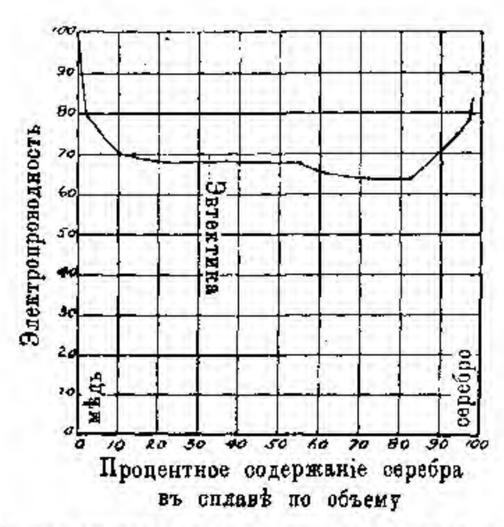


Рис. 56. Кривая электропроводности сплавовъ серебра съ мѣдью.

Matthiessen, Phil. Trans. Royal Soc., CL, стр. 170, 1860.

134) Серія сплавовъ, образованныхъ металлами съ ограниченной взаимной растворимостью: типъ сплавовъ висмута съ оловомъ.

Въ § 60, а также на рис. 49 было указано, что въ такого рода серіяхъ сплавовъ средніе члены обладаютъ эвтектикой, крайніе же представляютъ собой твердые растворы. Къ этому классу принадлежатъ и сплавы мѣди съ серебромъ, но у нихъ очень ограничена область твердыхъ растворовъ. Повидимому, у нихъ уже образуется эвтектика, когда содержаніе серебра въ мѣди или мѣди въ серебрѣ превышаетъ 1%.

Существованіе твердыхъ растворовъ въ этой серіи выражается на кривой электропроводности (рис. 56) непрерывными,

почти прямолинейными участками по обѣимъ сторонамъ діаграммы.

Кромѣ того, изъ рис. 31 видно, что въ той части діаграммы, которая отвѣчаетъ такимъ сплавамъ, обладающимъ эвтектикой, послѣдовательные слои въ моментъ отложенія состоятъ изъ: 1) ненасыщеннаго твердаго раствора, постепенно приближающагося къ точкѣ насыщенія, такъ что каждый слой его содержитъ большее количество раствореннаго металла, чѣмъ предыдущіе слои (участокъ BB'); изъ 2) насыщеннаго твердаго раствора, составъ котораго слегка измѣняется отъ слоя къ слою, по мѣрѣ того, какъ съ пониженіемъ температуры происходитъ перемѣщеніе точки насыщенія (участокъ $B'C$), и 3) изъ эвтектики (участокъ CD). Если такого рода неоднородное строеніе слоевъ не сглажено окончательно диффузіей, тогда кривая электропроводности можетъ и не представлять собой прямой линіи въ эвтектической области; она можетъ даже обладать критической точкой, соотвѣтствующей эвтектическому составу. Ибо, налѣво отъ этой точки мы имѣемъ эвтектику, плюсъ 1) насыщенный и 2) постепенно измѣняющійся твердый растворъ мѣди въ серебрѣ; направо—эвтектику, плюсъ такіе же растворы, но только серебра въ мѣди.

Такимъ образомъ, на обоихъ концахъ мы имѣемъ по два избыточныхъ вещества, въ томъ случаѣ, если диффузіей не была сглажена первоначальная неоднородность. Ясно, что въ лѣвой части діаграммы на электропроводность должно оказывать иное дѣйствіе постепенно увеличивающееся количество этихъ растворовъ мѣди въ серебрѣ, чѣмъ равное количество подобныхъ же растворовъ серебра въ мѣди съ правой стороны. Вслѣдствіе этого, линіи направо и налѣво отъ эвтектики должны идти подъ разными уклонами, а отсюда слѣдуетъ, что эвтектическому составу должна отвѣчать критическая точка.

По той же причинѣ можно было бы ожидать критическихъ точекъ на границахъ между крайними частями кривой, соотвѣтствующими твердымъ растворамъ, и между средней ея частью, соотвѣтствующей области эвтектики. Кромѣ того, эта послѣдняя часть также можетъ образовать очень сложную кривую, потому что составъ и количество избыточныхъ веществъ (насыщенный и ненасыщенный твердые растворы) могутъ быть непостоянны.

Неудивительно, что, въ виду такой сложности, кривая электропроводности (рис. 56) плохо согласуется съ результатами, полученными нами относительно строенія этого сплава при помощи микроскопическаго изслѣдованія. Да и, вообще говоря, кривая электропроводности при обыкновенной температурѣ даетъ очень мало указаній по сравненію съ кривыми охлажденія и замерзанія, въ связи съ микроскопическимъ изслѣдованіемъ.

135) Серія сплавовъ, въ которой одинъ изъ членовъ опредѣленное химическое соединеніе.—Какъ уже было выяснено въ § 126, такая серія состоитъ въ дѣйствительности изъ двухъ отдѣльныхъ серій, 1) металла A и опредѣленнаго химическаго соединенія, и 2) металла B и того же соединенія. Каждой изъ этихъ серій должна отвѣчать своя діаграмма, видъ которой бу-

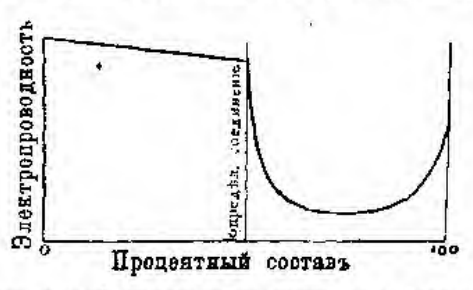


Рис. 57. Общій видъ кривой электропроводности ряда сплавовъ двухъ металловъ, въ которомъ одинъ членъ представляетъ собою опредѣленное химическое соединеніе; послѣднее же, въ свою очередь, съ однимъ изъ металловъ образуетъ рядъ сплавовъ, обладающій эвтектикой на всемъ своемъ протяженіи, а съ другимъ—рядъ сплавовъ, представляющихъ собою твердые растворы.

детъ зависѣть отъ только что указанныхъ обстоятельствъ. Опредѣленному химическому соединенію должна отвѣчать критическая точка въ мѣстѣ соединенія обѣихъ діаграммъ. Обѣ діаграммы должны представлять собой прямыя линіи въ томъ случаѣ, если и та и другая серіи обладаютъ эвтектикой на всемъ своемъ протяженіи; общая діаграмма будетъ состоять изъ двухъ прямыхъ линій, пересѣкающихся въ точкѣ, отвѣчающей опредѣленному соединенію. Если обѣ серіи представляютъ собой твердые растворы, тогда каждой изъ нихъ будетъ отвѣчать непрерывная кривая; эти кривыя опять таки встрѣтятся въ точкѣ, соотвѣтствующей опредѣленному соединенію. Если бы одна серія состояла изъ твердыхъ растворовъ, другая же обладала бы на всемъ своемъ протяженіи эвтектикой, тогда кривая имѣла бы видъ, указанный на рис. 57; и т. д. и т. д.

Мы изучили, такимъ образомъ (§§ 131—135), различные типы кривыхъ электропроводности для различныхъ типовъ строенія сплавовъ.

Наоборотъ, опредѣливъ видъ кривой электропроводности для новой серіи сплавовъ, можно примѣнить тѣ же разсужденія и сдѣлать заключеніе о вѣроятномъ строеніи этихъ сплавовъ. Для провѣрки, конечно, вслѣдъ за этимъ необходимо прибѣгнуть къ микроскопическому изслѣдованію. Насколько близко вообще данныя электропроводности совпадаютъ съ микроскопическими, остается еще невыясненнымъ.

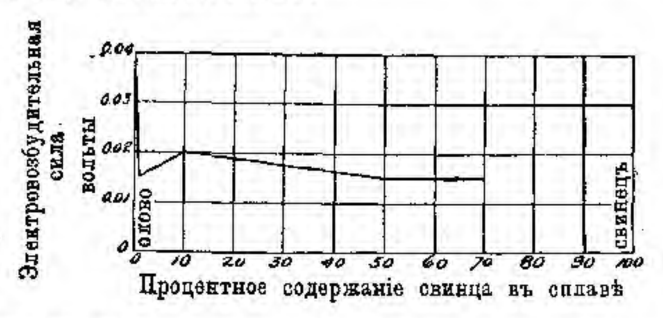


Рис. 58. Электродвижущая сила сплавовъ свинца съ оловомъ.

Laurie, «Journ. Chem. Soc.», LV, стр. 677, 1889.

136) Другія свойства.—Очевидно, что все сказанное нами относительно кривыхъ электропроводности равнымъ образомъ приложимо также и къ кривымъ теплопроводности, твердости, плотности, расширенія и многихъ другихъ свойствъ.

137) Электродвижущая сила.—Совершенно такъ же, какъ и въ случаѣ другихъ физическихъ свойствъ, кривая электродвижущей силы является непрерывной, если два металла образуютъ серію сплавовъ, состоящую изъ твердыхъ растворовъ. Но если сплавы обладаютъ эвтектикой, тогда, очевидно, кривая должна имѣть совершенно иной видъ.

Такъ, напримѣръ, сплавы олова съ свинцомъ можно разсматривать, какъ механическія смѣси листочковъ свинца и олова, представляющіе собой эвтектику и избыточное вещество (§ 48). Для опредѣленія электродвижущей силы этихъ сплавовъ, возьмемъ слегка кислый растворъ хлористаго олова и погрузимъ въ него пластинку олова въ качествѣ одного электрода и пластинку свинца, покрытую хлористымъ свинцомъ, въ качествѣ дру-

того электрода. Электродвижущая сила обусловливается только листочками олова въ сплавѣ, листочки же свинца остаются инертными, иначе говоря—электродвижущая сила не должна зависѣть отъ содержанія олова въ сплавѣ. Она обусловливается разницей потенціала между листочками олова въ сплавѣ и свинцовымъ электродомъ, а не величиною поверхности этихъ листочковъ. Подтвержденіемъ можетъ служить кривая электродвижущей силы этихъ сплавовъ, найденная Laurie (рис. 58)[1].

---

[1]) Мы можемъ расматривать эти сплавы не какъ смѣси, состоящія изъ химически чистыхъ свинца и олова, а какъ смѣси, образованныя изъ листочковъ олова съ небольшимъ содержаніемъ свинца и листочковъ свинца съ небольшимъ содержаніемъ олова. Изъ рѣзкаго паденія электродвижущей силы при переходѣ отъ чистаго олова къ содержащему 1% свинца, а также изъ того, что далѣе кривая идетъ тоже горизонтально (отклоненіе, повидимому, лежитъ въ предѣлахъ погрѣшности опыта), можно заключить, что одного процента (или даже менѣе) свинца достаточно для насыщенія олова. Такимъ образомъ, составъ листковъ олова, а слѣдовательно и электродвижущая сила, не зависятъ отъ общаго количества свинца въ сплавѣ, при томъ только условіи, что его достаточно для насыщенія олова, т. е. если онъ содержится въ сплавѣ въ количествѣ одного процента или даже менѣе.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

Металлографія желѣза и стали.

138) Введеніе.—Прежде всего разсмотримъ въ общихъ чертахъ различные сорта желѣза и стали, ихъ строеніе и свойства. Далѣе обратимся къ вопросу о возникновеніи этого строенія, къ измѣненіямъ въ твердомъ металлѣ (глава IX) и къ важнѣйшимъ методамъ тепловой обработки.

139) Общій обзоръ.—Что представляютъ собой продажныя и примѣняемыя въ техникѣ желѣзо и сталь? Микроскопическое ихъ изслѣдованіе показываетъ, что это вещества сложнаго строенія, состоящія на-подобіе гранита, изъ механической смѣси микроскопическихъ частичекъ нѣкоторыхъ совершенно опредѣленныхъ простыхъ веществъ; количественное отношеніе послѣднихъ между собой можетъ очень сильно колебаться. На рис. 1 показано типичное строеніе подобныхъ механическихъ смѣсей.

Изъ этихъ веществъ главными являются:

1) Чистое (или почти чистое) металлическое желѣзо, называемое ферритомъ, мягкое, очень тягучее, обладающее высокой степенью электропроводности и вообще, за исключеніемъ цвѣта, напоминающее по свойствамъ мѣдь.

2) Опредѣленный карбидъ желѣза, Fe_3C, называемый цементитомъ, болѣе твердый, чѣмъ стекло, но настолько же хрупкій; повидимому, можетъ выдерживать большую силу, прилагаемую постепенно въ вертикальномъ направленіи.

Необходимо замѣтить тотъ важный фактъ, вокругъ котораго будутъ группироваться всѣ остальныя явленія, что всѣ сорта желѣза и стали, обладающіе міровымъ значеніемъ и представляющіе наибольшую техническую цѣнность, состоятъ въ существенныхъ чертахъ изъ тѣсной смѣси этихъ двухъ рѣзко отличающихся между собой микроскопическихъ составляющихъ, феррита, подобно мѣди, чрезвычайно мягкаго и тягучаго, и цементита, подобно стеклу, чрезвычайно твердаго и ломкаго. Правда, на свойства многихъ сортовъ желѣза и стали вліяетъ, и притомъ чрезвычайно сильно, тепловая и механическая обработка, а также и присутствіе въ нѣкоторыхъ изъ нихъ шлака или графита. Но пока необходимо сосредоточить вниманіе на томъ фактѣ, что разница въ свойствахъ различныхъ техническихъ сортовъ желѣза и стали зависитъ главнымъ образомъ отъ количественнаго отношенія феррита къ цементиту.

Правда, какъ мы вскорѣ увидимъ, только что сказанное неприложимо къ такъ называемой «закаленной стали», которая состоитъ не изъ феррита и цементита, но, главнымъ образомъ, изъ аустенита. Съ другой стороны, оно вполнѣ приложимо къ многочисленнымъ техническимъ сортамъ сварочнаго желѣза и стали, какъ, напримѣръ, стали, употребляемой на постройку судовъ, а также для заклепокъ, заборной проволоки, трубъ, рельсовъ, жести; кромѣ того, къ тѣмъ сортамъ стали, которые употребляются при постройкахъ, напримѣръ для балокъ, наугольниковъ и т. д.

Очень мягкая и тягучая сталь,—напримѣръ, изъ которой дѣлаются заклепки и листы для котловъ, состоитъ главнымъ образомъ изъ мягкаго, тягучаго, подобнаго мѣди, феррита; точно также и сталь, обладающая большой электропроводностью и примѣняемая для телеграфныхъ и телефонныхъ проволокъ. Въ такихъ сортахъ стали содержаніе цементита можетъ не превышать одного процента, остальная же часть состоитъ почти изъ чистаго феррита.

Иной составъ болѣе твердыхъ сортовъ стали, какъ, напримѣръ, рельсовой, отъ которой требуется, чтобы она могла хорошо противостоять изнашиванію, вызываемому дѣйствіемъ на нее вагонныхъ колесъ и усиливаемому пескомъ, попадающимъ между колесами и рельсами. Такая сталь содержитъ около 93% феррита, остальные же 7% приходятся на долю цементита. При по-

добномъ количествѣ цементита, способность стали противостоять изнашиванію сильно повышается, и въ то же время тягучесть ея, хотя и уменьшается весьма замѣтно, но не до опасныхъ предѣловъ.

Понятно, по мѣрѣ увеличенія содержанія цементита и уменьшенія содержанія феррита, тягучесть непрерывно уменьшается, въ то время какъ твердость возрастаетъ. Однако, тягучесть достигаетъ максимума при содержаніи цементита около 15%, феррита около 85%. Съ дальнѣйшимъ повышеніемъ содержанія цементита тягучесть вновь понижается. Въ общихъ чертахъ эти явленія



Рис. 59. Физическія свойства и микроскопическое строеніе несодержащей графита медленно охлажденной стали и бѣлаго чугуна (перлитовая группа).

Примѣчаніе.—Подъ проц. содержаніемъ феррита разумѣется, какъ ферритъ, входящій въ составъ перлита, такъ и избыточный ферритъ. То же самое относится и до цементита.

представлены на рис. 59. Эти кривыя предназначены только для того, чтобы дать извѣстный общій обзоръ указанныхъ явленій, потому что для даннаго состава свойства очень сильно измѣняются въ зависимости отъ обработки, которой былъ подвергнутъ металлъ. Относительно твердости не имѣется заслуживающихъ довѣрія данныхъ.

Обыкновенно составъ стали не принято выражать въ процентахъ феррита и цементита. Это въ сильной степени зависитъ отъ недостаточнаго знакомства большинства инженеровъ и металлурговъ съ металлографіей. Но уже недалеко то время, когда каждый практикъ принужденъ будетъ усвоить себѣ эту точку

зрѣнія, которая одна только въ состояніи дать возможность понять зависимость между составомъ и свойствами различныхъ сортовъ желѣза и стали. Вмѣсто того, чтобы сказать, что данная сталь, напримѣръ рельсовая сталь, содержитъ столько-то цементита, обычно указывается только количество углерода, содержащагося въ цементитѣ. Напримѣръ, вмѣсто того, чтобы сказать, что рельсовая сталь содержитъ около 7,5% цементита и приблизительно 92,5% феррита, обычно, для удобства, говорится, что она содержитъ около 0,50% углерода. 0,50% углерода соотвѣтствуютъ 7,5% цементита (Какъ производится такого рода вычисленіе, будетъ указано въ § 153).

Помимо этихъ двухъ важнѣйшихъ составляющихъ, феррита и цементита, имѣютъ еще значеніе три другихъ, именно графитъ, шлакъ и аустенитъ.

Графитъ: Сѣрый чугунъ.

Графитъ является важной составной частью чугуна, въ особенности сѣраго чугуна; для нашихъ настоящихъ цѣлей мы можемъ принять, что графитъ или совершенно не присутствуетъ въ стали, или если и присутствуетъ, то въ только въ незначительномъ количествѣ.

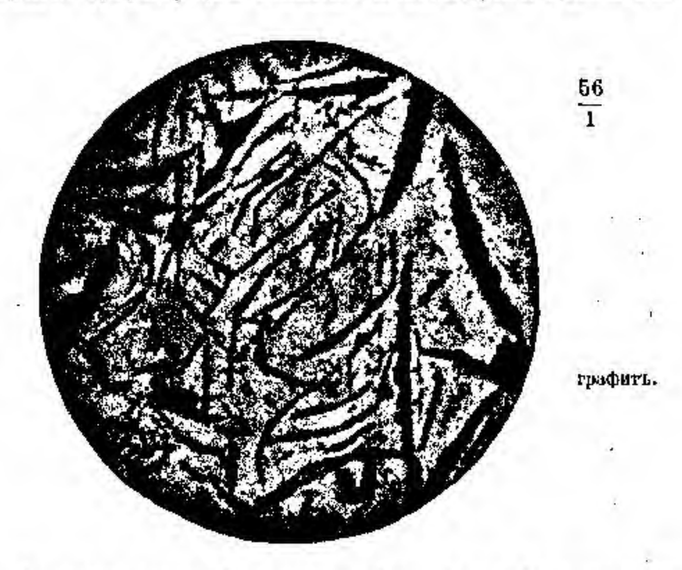


Рис. 60. Сѣрый чугунъ, отлитый въ песокъ. Кремній 1,54%; сѣра 0,075%.
(Sauveur, «The Metallographist», III, стр. 156).

Сѣрый чугунъ, единственный изъ всѣхъ сортовъ чугуна, который находитъ широкое примѣненіе въ техникѣ, можно разсматривать какъ механическую смѣсь второго порядка. Онъ состоитъ, во-первыхъ, подобно стали, изъ механической смѣси феррита съ цементитомъ; во-вторыхъ, изъ большого количества свободнаго углерода, разбросаннаго въ видѣ листочковъ графита во всей этой смѣси, служащей для него какъ бы основной массой. Присутствіе такого непрочнаго тѣла, какъ графитъ, конечно, дѣлаетъ массу болѣе хрупкой; этимъ и объясняется непрочность и хрупкость сѣраго чугуна.

Графитъ представляетъ собой чистый или почти чистый углеродъ въ видѣ тонкихъ, гибкихъ пластинокъ, которыя образуютъ болѣе или менѣе непрерывный остовъ, заключенный въ массѣ сѣраго чугуна. Повидимому, этотъ графитъ одинаковъ съ естественнымъ минераломъ графитомъ.

Бѣлый чугунъ.

Типичный бѣлый чугунъ состоитъ, подобно стали, изъ цементита и феррита, но только содержаніе цементита въ немъ можетъ доходить до 67% (скажемъ, 4,50% углерода). Этимъ и объясняется настолько большая твердость и ломкость этихъ сортовъ чугуна, что они совершенно непримѣнимы для большинства техническихъ цѣлей. Но большая часть продажнаго бѣлаго чугуна является промежуточной между этимъ крайнимъ типомъ и сѣрымъ чугуномъ, такъ какъ содержитъ гораздо больше цементита, чѣмъ сѣрый чугунъ, но въ то же время и гораздо меньше графита. Слѣдовательно, продажный бѣлый чугунъ, подобно сѣрому, также представляетъ собой механическую смѣсь второго порядка; онъ состоитъ, во-первыхъ, изъ металлической основной массы, въ свою очередь состоящей изъ механической смѣси большого количества цементита и перемѣннаго количества феррита, и, во-вторыхъ, изъ небольшого количества графита, разсѣяннаго въ основной массѣ.

Шлакъ: Сварочное желѣзо.

Сварочное желѣзо состоитъ изъ металлической основной массы, идентичной съ сталью съ низкимъ содержаніемъ углерода, въ которой механически заключено небольшое количество

шлака, силиката желѣза. Нельзя сказать, чтобы этотъ шлакъ не игралъ никакой роли, но гораздо важнѣе соотношеніе между цементитомъ и ферритомъ въ основной массѣ.

Аустенитъ: Закаленная сталь.

Закаленная, путемъ быстраго охлажденія съ температуры выше краснаго каленія, сталь состоитъ главнымъ образомъ изъ аустенита, твердаго раствора углерода въ желѣзѣ, концентрація котораго можетъ быть различной (см. § 149).

Аустенитъ очень твердъ и хрупокъ, когда содержаніе углерода въ немъ достигаетъ одного процента. Можно сказать, что твердость и хрупкость его приблизительно пропорціональны содержанію углерода. Вслѣдствіе этого сталь, отъ которой требуется очень большая твердость, какъ напр., для пилъ и другихъ рѣжущихъ инструментовъ для обработки металловъ и дерева, содержитъ отъ 0,75 до 2,00% углерода. Такая сталь обладаетъ требуемой твердостью и въ то же время не слишкомъ хрупка. Закалка производится путемъ очень быстраго охлажденія.

Кромѣ рѣжущихъ инструментовъ, изъ закаленной стали обыкновенно дѣлаются броневыя плиты и снаряды; слѣдовательно, они также главнымъ образомъ состоятъ изъ аустенита. Очевидно, что сталь, содержащая аустенитъ, играетъ важную роль въ техникѣ, по крайней мѣрѣ, по сравненію съ другими сплавами. Но примѣненіе ея ничтожно по сравненію съ примѣненіемъ стали, не содержащей аустенита и состоящей изъ феррита и цементита.

На общей діаграммѣ соединеній желѣза съ углеродомъ (рис. 68) каждой изъ этихъ составляющихъ отвѣчаетъ своя область; справа и слѣва проходитъ граница содержанія углерода, снизу и сверху температурная граница. Нѣкоторыя изъ этихъ границъ установлены еще не совсѣмъ точно, а также нельзя еще съ увѣренностью сказать, какія составляющія являются нормальными для нѣкоторыхъ областей.

Кромѣ того составляющія часто проникаютъ въ чужую область. Тѣмъ не менѣе, данная діаграмма, которой мы обязаны главнымъ образомъ Roberts-Austen, Osmond и Roozeboom, приноситъ огромную пользу при изученіи этого вопроса. Хорошее

пониманіе металлургіи желѣза невозможно безъ усвоенія этой діаграммы, хотя бы въ основныхъ чертахъ.

Таблица 6 даетъ приблизительное предсталленіе о строеніи различныхъ сортовъ желѣза и стали.

Тепловая обработка.

Мнноходомъ выше было указано, что свойства нѣкоторыхъ сортовъ желѣза и стали испытываютъ большое измѣненіе подъ вліяніемъ тепловой обработки. Повидимому, 1) это отчасти вызывается измѣненіемъ величины и расположенія микроскопическихъ зеренъ, которыя образуютъ данную механическую смѣсь, 2) отчасти же аллотропическими измѣненіями самаго желѣза. Но въ очень сильной степени вліяніе, оказываемое тепловой обработкой, зависитъ также отъ того, что углеродъ, могущій существовать въ трехъ состояніяхъ, въ видѣ карбида желѣза (Fe_3C), твердаго раствора углерода въ желѣзѣ (аустенитъ) или свободнаго углерода (графитъ), при этомъ до извѣстной степени переходитъ изъ одного состоянія въ другое. Вслѣдствіе этого естественно, что вліяніе тепловой обработки тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше содержаніе углерода въ металлѣ. Такъ, на сварочное желѣзо и сталь съ очень малымъ содержаніемъ углерода (отъ 0,06 до 0,10%) тепловая обработка вліяетъ очень мало. Сталь же съ бо̀льшимъ содержаніемъ углерода измѣняется при этомъ очень сильно. Точно также и свойства чугуна можно сильно измѣнить тепловой обработкой.

Специальныя стали, какъ никкелевая, марганцовая, вольфрамовая, хромовая и молибденовая, обладаютъ важными отличительными свойствами, но надо сказать, что значеніе ихъ второстепенное по сравненію съ вышеуказанными видами желѣзныхъ продуктовъ.

Итакъ, замѣтимъ еще разъ, что существеннымъ отличіемъ сварочнаго желѣза отъ стали служитъ то, что первое всегда содержитъ нѣкоторое количество шлака. Сталь же отъ чугуна рѣзко отличается тѣмъ, что послѣдній содержитъ больше углерода; границей между ними можно считать 2% углерода.

Послѣ такого бѣглаго обзора займемся теперь болѣе подробнымъ изученіемъ нѣкоторыхъ частностей.

Таблица 4.

Общая классификація желѣза и стали.

		Съ очень малымъ содержаніемъ углерода.	Съ среднимъ содержаніемъ углерода.	Съ большимъ содержаніемъ углерода.
Содержащій шлакъ или сварочный металлъ.		Сварочное желѣзо Пудлинговое Изготовленное на древесномъ углѣ.	Сварочная сталь Пудлинговая. Цементная.	
Несодержащій шлака или литой металлъ.	Нормальная или углеродистая группа.	Мягкая сталь или литое желѣзо Бессемеровская Мартеновская Тигельная	Ковкій чугунъ. Полутвердая и твердая нормальная или углеродистая сталь Бессемеровская Мартеновская Тигельная	Ковкій чугунъ. Нормальный чугунъ. Бѣлый, Половинчатый, Сѣрый, Зеркальный.
	Группа сплавовъ.		Спеціальныя стали. Никкелевая, Вольфрамовая, Марганцовая, Хромовая, Кремніевая.	Спеціальные чугуны. Ферро-вольфрамъ, Ферро-марганецъ, Ферро-хромъ, Ферро-кремній, Силико-шпигель.
% углерода		0—0,3	0,3—2,0	2,0—4,5 | до 6,0

140) Общая классификація желѣза и стали.—Въ таблицѣ 4 сгруппированы наиболѣе важныя разновидности желѣза и стали. Онѣ могутъ быть подраздѣлены: 1) по нахожденію или отсутствію шлака на *A*) содержащія шлакъ или сварочныя м на *B*) не содержащія шлака или литыя; 2) по содержанію

углерода на *A*) сталь съ малымъ содержаніемъ углерода и сварочное желѣзо, *B*) сталь съ большимъ содержаніемъ углерода и *C*) чугунъ; 3) согласно тому, зависятъ ли ихъ свойства главнымъ образомъ отъ содержанія углерода или другого элемента, на *A*) углеродистые или нормальные и *B*) спеціальные стали и чугуны; 4) согласно способу изготовленія на *A*) бессемеровскую сталь *B*) мартеновскую и т. д.

Важнѣе всего подраздѣленіе по содержанію углерода.

141) Подраздѣленіе на три обширныхъ класса по содержанію углерода.—При такого рода подраздѣленіи получаются три слѣдующихъ обширныхъ класса:

1) содержаніе углерода менѣе 0,30%—при отсутствіи шлака мягкая или низкоуглеродистая сталь; когда шлакъ присутствуетъ — сварочное желѣзо. По свойствамъ, данныя сталь и желѣзо отличаются мягкостью, тягучестью и сравнительной непрочностью (сопротивленіе на разрывъ для стали около 50,000—80,000 фунтовъ на кв. дюймъ). Прочность ихъ меньше, чѣмъ прочность принадлежащей ко второму классу стали съ большимъ содержаніемъ углерода, но гораздо значительнѣе чугуновъ. Закалкѣ поддаются сравнительно мало (§ 139).

2) Содержаніе углерода между 0,30% и 2,00% — сталь съ среднимъ или высокимъ содержаніемъ углерода, иначе, сталь средней твердости или твердая. Тверже, менѣе тягуча и болѣе прочна, чѣмъ сталь съ низкимъ содержаніемъ углерода; болѣз тягуча и гораздо прочнѣе чугуновъ. Способность принимать закалку рѣзко выражена.

Сопротивленіе на разрывъ обыкновенно между 80,000 и 130,000 фунтовъ на кв. дюймъ. Съ повышеніемъ содержанія углерода, повидимому, неограниченно возрастаютъ твердость и способность принимать закалку и уменьшается тягучесть. Сопротивленіе же на разрывъ увеличивается съ повышеніемъ содержанія углерода до тѣхъ поръ, пока послѣднее не достигнетъ приблизительно 1,00—1,20%, а затѣмъ уменьшается.

3) Содержаніе углерода болѣе 2,00%,—чугунъ. Чугунъ гораздо менѣз проченъ и тягучъ, чѣмъ желѣзо и сталь, принадлежащія къ 1) и 2) классамъ. Чугунъ можетъ быть «бѣлымъ», «сѣрымъ» или «половинчатымъ». Въ бѣломъ чугунѣ большая часть углерода находится въ соединеніи съ желѣзомъ, а не въ видѣ графита.

Въ сѣромъ чугунѣ значительная часть углерода находится въ состоянiи графита, такъ что сѣрый чугунъ представляетъ собой механическую смѣсь свободнаго углерода, графита, съ остальной металлическою частью массы.

Половинчатый чугунъ является среднимъ между сѣрымъ и бѣлымъ чугуномъ. Часть содержающагося въ немъ углерода находится въ свободномъ состоянiи, въ видѣ графита, часть же образуетъ химическое соединенiе съ желѣзомъ.

Изъ этихъ трехъ видовъ чугуна, сѣрый, самый мягкiй и наименѣе хрупкiй, бѣлый, самый твердый и самый хрупкiй. Наиболѣе же прочный, это среднiй между бѣлымъ и сѣрымъ.

Сѣрый чугунъ можетъ быть одинаковъ по мягкости съ сталью съ малымъ содержанiемъ углерода; бѣлый же чугунъ можетъ быть настолько же и даже болѣе твердъ, чѣмъ сталь съ высокимъ содержанiемъ углерода. Но въ то же время, всѣ эти виды чугуна менѣе прочны и болѣе хрупки, чѣмъ сталь, каково бы въ ней ни было содержанiе углерода. Такимъ образомъ, всѣ виды чугуна непрочны и хрупки, но нѣкоторые изъ нихъ очень мягки, другiе же очень тверды.

На рис. 59 показана зависимость этихъ трехъ важныхъ физическихъ свойствъ, сопротивленiя на разрывъ, тягучести и твердости, отъ содержанiя углерода (сѣрый и половинчатый чугунъ при этомъ оставлены безъ вниманiя). Въ итогѣ можно сказать, что по мѣрѣ повышенiя содержанiя углерода, твердость увеличивается, тягучесть же уменьшается, повидимому, неограниченно. Что же касается до сопротивленiя на разрывъ, то оно достигаетъ максимума при 1,00—1,20% углерода и съ дальнѣйшимъ повышенiемъ содержанiя его уменьшается.

Сварочное желѣзо.

Разновидности желѣза, относящiяся къ сварочнымъ, содержатъ небольшое количество шлака (обыкновенно отъ 0,20 до 2,00%), состоящаго изъ сильно основного силиката окиси желѣза. Это происходитъ отъ того, что онѣ получаются путемъ свариванiя размягченныхъ частицъ металла при очень высокой температурѣ, окруженныхъ этимъ шлакомъ, при чемъ шлакъ не удаляется нацѣло при помощи послѣдующаго расплавленiя металла или инымъ образомъ.

Изъ этихъ разновидностей въ настоящее время имѣетъ значеніе только сварочное желѣзо, которое обыкновенно содержитъ очень мало углерода. Характерное строеніе его представлено на рис. 61; черныя полоски—это шлакъ, образующій какъ бы нити, при прокаткѣ или ковкѣ тѣхъ комковъ, въ видѣ которыхъ первоначально получается сварочное желѣзо. Остальная часть массы состоитъ изъ отдѣльныхъ кристалловъ почти чистаго желѣза или «феррита», переплетающихся между собой, и вслѣдствіе этого деформированныхъ. Различіе въ окраскѣ ихъ вызывается неодинаковымъ дѣйствіемъ на различные кристаллы азотной кислоты или иного реактива, примѣненнаго для травле-

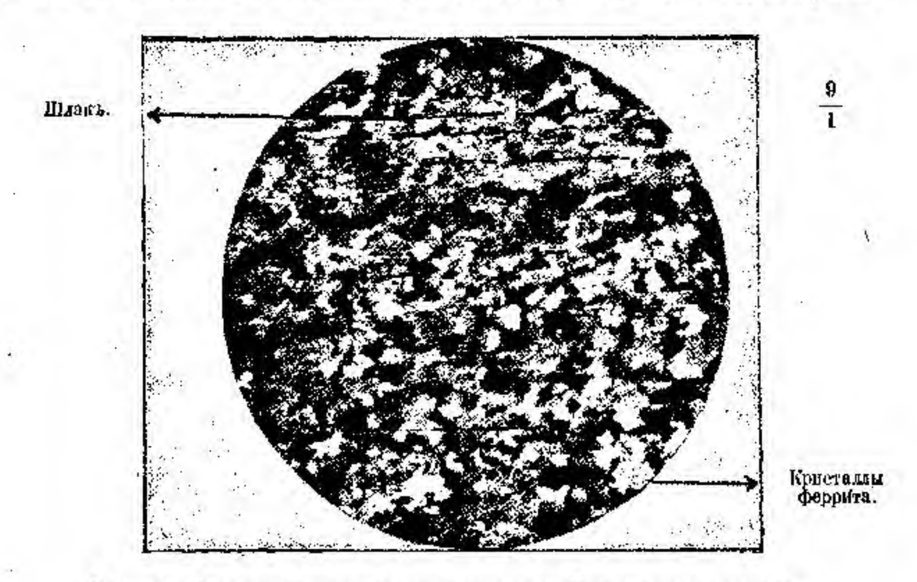


Рис. 61. Сварочное желѣзо, прокованное. Продольный разрѣзъ.

За исключеніемъ прослоекъ шлака, вся остальная масса состоитъ изъ кристалловъ феррита, переплетающихся между собой и потому имѣющихъ неправильную форму (Sorby, «Jour. Iron and Steel Inst.», I, 1887, стр. 255 и слѣд.).

нія даннаго образчика. Это объясняется различіемъ въ оріентировкѣ кристалловъ, т. е. въ направленіи осей и плоскостей спайности различныхъ кристалловъ.

Отъ стали съ низкимъ содержаніемъ углерода, идущей, напримѣръ, на выдѣлку заклепокъ, заборной проволоки, а также отъ листового желѣза, примѣняемаго для выдѣлки крытой оловомъ жести, сварочное желѣзо отличается главнымъ образомъ тѣмъ, что оно содержитъ небольшое количество шлака. Такая

сталь, можно сказать, совершенно не содержитъ шлака, по той простой причинѣ, что она отливается въ очень жидкомъ состоянiи въ болванки, при чемъ шлакъ отдѣляется, всплывая, благодаря своему малому удѣльному вѣсу, на поверхность.

Содержанiе углерода въ сварочномъ желѣзѣ и такой стали по существу одинаково, вслѣдствiе чего и свойства ихъ очень схожи, поскольку это возможно, вслѣдствiе присутствiя шлака въ первомъ. При существующихъ способахъ выработки такая сталь содержитъ больше марганца и меньше фосфора, чѣмъ большинство сортовъ сварочнаго желѣза. Это вызываетъ также нѣкоторое различiе между сварочнымъ желѣзомъ и сталью. Но это различiе вовсе не необходимо, да и не существенно.

142) Опредѣленiя.—Разсмотрѣвъ приведенную выше классификацiю, мы видимъ, что для названiя сталь существуютъ два различныхъ основанiя. «Сварочная сталь» называется сталью потому, что она отличается отъ сварочнаго желѣза бо̀льшимъ содержанiемъ углерода, отъ чугуна же—ковкостью. Сталь съ низкимъ содержанiемъ углерода называется сталью потому, что она отличается отъ сварочного желѣза отсутствiемъ шлака, отъ чугуна же ковкостью. Съ такой запутанной номенклатурой приходится мириться, по крайней мѣрѣ, въ настоящее время.

Но дѣло обстоитъ вовсе не такъ серьезно, какъ оно кажется съ перваго взгляда. Сварочная сталь не играетъ значительной роли. Три наиболѣе важныхъ класса желѣзныхъ продуктовъ, это сварочное желѣзо, сталь и чугунъ. Сварочное желѣзо легко и почти безошибочно можно отличить отъ остальныхъ, благодаря тому, что оно содержитъ шлакъ. Къ счастью, есть еще одинъ критерiй, который можно принять для различенiя многочисленныхъ видовъ стали съ одной стороны, и чугуновъ съ другой. Этотъ критерiй мы можемъ въ будущемъ примѣнять всякiй разъ, когда предъ нами встанетъ вопросъ, какъ назвать данныя разновидности желѣза—сталью или чугуномъ. Критерiй этотъ—ковкость, по крайней мѣрѣ въ одномъ какомъ либо температурномъ интервалѣ. Мы можемъ принять его потому, что ковкость есть, вѣроятно, единственное отличительное свойство, которой обладаютъ всѣ современные виды стали, и которое отсутствуетъ у всѣхъ видовъ чугуна. При этомъ, мы исключаемъ спецiальный продуктъ, извѣстный подъ именемъ «ковкаго чугуна», который стоитъ совершенно особнякомъ по

способу выдѣлки, строенію и свойствамъ. Въ дальнѣйшей схемѣ мы будемъ пользоваться этимъ критеріемъ.

Чугунъ—желѣзо, содержащее такое количество углерода или эквивалентнаго ему вещества, что оно не обладаетъ ковкостью ни при какой температурѣ.

Въ случаѣ нормальныхъ или углеродистыхъ чугуновъ, свойства которыхъ главнымъ образомъ зависятъ отъ содержанія углерода, въ отличіе отъ чугуновъ спеціальныхъ (см. ниже), можно въ настоящее время произвольно принять за границу между сталью и чугуномъ 2°/о углерода. Какъ скоро будэтъ опредѣлена граница между нормально содержащими графитъ и нормально графита не содержащими соединеніями углерода съ желѣзомъ, ее будетъ удобно принять за естественную границу между сталью и желѣзомъ, вмѣсто произвольной границы, которую мы временно прииимаемъ (см. § 163).

Въ сѣромъ чугунѣ значительная часть углерода находится въ видѣ графита. Въ бѣломъ чугунѣ графита очень мало, такъ какъ большая часть углерода химически соединена съ желѣзомъ. Въ половинчатомъ чугунѣ заключается промежуточное количество графита.

Ковкій чугунъ—желѣзо, первоначально отлитое въ видѣ чугуна, которому затѣмъ придана ковкость путемъ послѣдующей обработки безъ плавленія.

Сталь—желѣзо, ковкое по крайней мѣрѣ въ одномъ температурномъ интервалѣ и a) или отлитое въ видѣ съ самаго начала ковкой маосы, или b) способное принимать закалку при быстромъ охлажденіи, или c) отлитое такимъ путемъ и способное принимать закалку (вольфрамовая сталь и нѣкоторые виды марганцовой ковки только при температурѣ краснаго каленія).

Спеціальные стали и чугуны—обязанные своими свойствами главнымъ образомъ присутствію элемента (или элементовъ) иныхъ, нежели углеродъ.

Сварочное желѣзо—содержащее шлакъ, ковкое желѣзо, не принимающее существенной закалки при быстромъ охлажденіи. Большая часть сварочнаго желѣза въ настоящее время предоставляетъ собой «пудлинговое желѣзо», т. е. полученное путемъ процесса пудлингованія (см. § 277).

Литое желѣзо—свободная отъ шлака сталь, содержащая менѣе 0,30°/о углерода.

Литая сталь—свободная отъ шлака сталь, содержащая болѣе 0,30% углерода.

Сварочная сталь, содержащая шлакъ разновидность желѣза, ковкая при нѣкоторой температурѣ и содержащая болѣе 0,30% углерода. Отъ сварочнаго желѣза отличается только бо̀льшимъ содержаніемъ углерода.

Нѣкоторыя добавочныя опредѣленія приведены въ приложеніи 2.

143) Углеродъ и желѣзо. При изученіи металлографіи желѣза, которой посвящена остальная часть этой главы, мы сосредоточимъ наше вниманіе на группѣ литого металла, характеризующейся отсутствіемъ шлака. Въ частности, мы разсмотримъ только нормальныя или углеродистыя соединенія желѣза, что же касается до сварочныхъ продуктовъ, а также спеціальныхъ сталей и чугуновъ, то они не будутъ подлежать разсмотрѣнію.

Такимъ образомъ, мы будемъ заниматься серіей quasi—сплавовъ желѣза съ углеродомъ, называемыхъ сталью, когда они содержатъ менѣе 2% углерода, и чугуномъ при бо̀льшемъ содержаніи.

Считаю необходимымъ вновь указать на то, что содержаніе углерода глубоко вліяетъ на свойства металла.

Различіе между самой тягучей заклепочной сталью, почти одинаковой по мягкости и ковкости съ мѣдью, самой твердой инструментальной или въ высшей степени упругой пружинной сталью и крайне твердымъ и хрупкимъ чугуномъ зависитъ отъ различнаго въ нихъ содержанія углерода и отъ того состоянія, въ которомъ онъ въ нихъ находится. Это видно изъ таблицы 5. (См. стр. 191).

Проще всего предположить, что въ расплавленномъ желѣзѣ весь углеродъ находится въ растворѣ независимо отъ того, въ какомъ онъ будетъ состояніи послѣ застыванія металла. Короче говоря, въ расплавленномъ состояніи всѣ соединенія желѣза съ углеродомъ представляютъ собой одинаковые растворы углерода въ желѣзѣ, или наоборотъ, при чемъ отличаются другъ отъ друга только степенью концентраціи.

Однако, при застываніи желѣза, углеродъ можетъ или перейти въ состояніе свободнаго углерода, т. е. графита, или можетъ остаться въ твердомъ желѣза, въ видѣ твердаго раствора, извѣстнаго подъ именемъ «аустенита». При дальнѣйшемъ охла-

Таблица 5.

Процентный составъ типичныхъ сортовъ стали.							Состояніе, въ которомъ примѣняется.
	Примѣненіе.	C	Si	Mn	P	S	
Прокатанная или кованая сталь.	Заклепки	0,04—0,10	0,05	0,65	0,04	0,06	Медленно охлажденныя (рядъ перлита).
	Трубы	0,06—0,08	0,01	0,60	0,12	0,06	
	Шины	0,6—0,7	0,25	0,79	0,05	0,05	
	Мосты	0,08—0,18	0,10	0,80	0,06	0,07	
	ж.-д. оси	0,25—0,40	0,04—0,06	0,40—0,80	0,06	0,05	
	Амер. рельсы	0,45—0,70	0,10—0,20	0,80—1,10	0,06—0,10	0,06—0,10	
Стальныя отливки.	Динамо-машины	0,15	0,12	0,04	—	—	
	Электрическія приспособленія	0,25 0,10	0,20 0,25	0,45 0,10	0,08	0,05	
	Болѣе твердыя приспособленія	0,30—0,50	0,35—0,50	0,80	0,05	0,05	
Прокатанная или кованая сталь.	ж.-д. вагонныя рессоры	0,75	0,35	0,85	0,07	—	Быстро охлажденная (рядъ аустенита).
	Рѣжущіе инструменты	0,75—1,50	—	—	—	—	
	Напильники	1,00—1,50	—	—	—	—	

жденіи металла, графитъ и аустенитъ могутъ остаться, какъ таковые, или они могутъ, нацѣло или отчасти, претерпѣть извѣстное измѣненіе, и углеродъ можетъ образовать опредѣленный карбидъ желѣза Fe_3C, называемый цементитомъ.

Такимъ образомъ, углеродъ можетъ находиться въ твердомъ желѣзѣ въ трехъ различныхъ состояніяхъ: 1) въ видѣ свободнаго графита, характернаго для сѣраго чугуна; 2) въ видѣ твердаго раствора углерода въ желѣзѣ, аустенита, характернаго

для закаленной, т. е. быстро охлажденной стали и для закаленнаго чугуна; 3) въ видѣ цементита, карбида желѣза Fe_3C, характернаго для нормально или медленно охлажденныхъ стали и чугуна. Эти и другія составляющія желѣза будутъ описаны въ § 145, и одновременно будутъ указаны тѣ области на рис. 68, въ которыхъ онѣ должны нормально встрѣчаться. Въ § 139 уже было указаніе на рис. 68, но гораздо полнѣе онъ будетъ разсмотрѣнъ въ § 162.

144) Причины спутанности въ принятой номенклатурѣ.— Небезынтересно мимоходомъ указать на то, какъ возникла спутанность въ принятой въ настоящее время номенклатурѣ, а также на чемъ послѣдняя основывается. Кромѣ того, полезно указать на то, какъ легко могутъ возникнуть недоразумѣнія, если даются названія, основанныя не на существенныхъ и опредѣленныхъ свойствахъ, а на случайныхъ, какъ бы послѣднія ни были важны.

Приблизительно до 1860 года существовало только три важныхъ класса желѣзныхъ продуктовъ—сварочное желѣзо, сталь и чугунъ. Характерною чертою сварочнаго желѣза было почти полное въ немъ отсутствіе углерода. Для стали было характерно умѣренное содержаніе углерода (приблизительно отъ 0,30 до 2%), хотя и достаточное, чтобы придавать ей способность дѣлаться очень твердой при быстромъ охлажденіи, однако не настолько большое, чтобы вызывать хрупкость въ медленно охлажденномъ металлѣ. Наконецъ, чугунъ характеризовался содержаніемъ углерода, достаточно большимъ, чтобы вызывать въ металлѣ хрупкость, все равно—при быстромъ или медленномъ охлажденіи. Эта классификація основывалась на содержаніи углерода, или на свойствахъ, имъ обусловливаемыхъ. Сварочное желѣзо и нѣкоторые сорты стали, которые тогда играли большую роль, необходимо содержали много шлака, потому что они приготовлялись путемъ сваряванія размягченныхъ частичекъ металла, окруженныхъ массою шлака, и притомъ безъ послѣдующаго расплавленія. Лучшій сортъ стали, тигельная сталь, освобождалась отъ шлака путемъ переплавленія въ тигляхъ. Отсюда происходитъ ея названіе «литая сталь».

Между 1860 и 1870 годами, при помощи бессемеровскаго и мартеновскаго способовъ, стали получать новый видъ желѣза, въ настоящее время называемый мягкою, или съ низкимъ со-

держаніемъ углерода сталью. Она не обладаетъ существеннымъ свойствомъ стали, способностью принимать закалку, но въ то же время отличается отъ сварочнаго желѣза отсутствіемъ шлака, отъ чугуна же своею ковкостью. Логически, этотъ продуктъ надо было бы назвать желѣзомъ, но это названіе не понравилось лицамъ, заинтересованнымъ въ изготовленіи новаго продукта, потому что бывшее тогда въ ходу сварочное желѣзо было малоцѣннымъ матеріаломъ. Единственно правильнымъ выходомъ было бы дать новому продукту совершенно новое названіе. Но такъ какъ съ названіемъ сталь у публики связывалось представленіе о высокой доброкачественности, то и рѣшили дать ему это названіе. Извиненіемъ служило то, что новый продуктъ походилъ на одинъ видъ стали—литую сталь- тѣмъ, что не содержалъ шлака. Нѣкоторое время противъ этого раздавались протесты, но затѣмъ всѣ согласились называть новый продуктъ сталью, и это названіе теперь является твердо установившимся. Старыя разновидности сварочнаго желѣза, стали, литой стали и чугуна сохраняютъ свои прежнія названія. Въ результатѣ, нѣкоторыя разновидности, какъ, напримѣръ, цементная сталь, называются сталью только потому, что онѣ обладаютъ способностью принимать закалку, другія же, какъ сталь съ низкимъ содержаніемъ углерода, потому, что они не содержатъ шлака. У первыхъ нѣтъ на лицо основного качества—отсутствія шлака, въ силу котораго вторыя называются сталью; вторыя же не обладаютъ основнымъ качествомъ—способностью принимать закалку, вслѣдствіе котораго первыя называются сталью. Постепенно названіе «сталь» стали прилагать скорѣе для обозначенія высокихъ качествъ продукта, а не какихъ-либо особенныхъ его свойствъ.

Такая неестественная номенклатура, весьма неудобная для читателя, не представляетъ замѣтныхъ затрудненій для крупныхъ производителей и потребителей желѣза и стали, развѣ только давая иногда лазейку при судебныхъ процессахъ.

145) Микроскопическія составляющія желѣза и стали.— Въ главѣ I мы въ общихъ чертахъ разсмотрѣли строеніе сплавовъ. Теперь займемся имъ вновь спеціально въ примѣненіи къ желѣзу и стали.

Большой шагъ впередъ, сдѣланный въ изученіи строенія стали и другихъ разновидностей желѣза, привелъ къ тому убѣжденію, что они весьма похожи на изверженныя и метаморфическія горныя породы, т. е. такія, которыя подобно различнымъ разновидностямъ желѣза, произошли путемъ охлажденія расплавленныхъ или, по крайней мѣрѣ, размягченныхъ массъ. Совершенно подобно тому, какъ гранитъ оказывается при ближайшемъ разсмотрѣніи состоящимъ изъ механической смѣси кристалловъ слюды, кварца и полевого шпата, изъ которыхъ каждый представляетъ собой опредѣленное химическое соединеніе, опредѣленной кристаллической формы и съ опредѣленными физическими свойствами, точно также подъ микроскопомъ видно, что обычно сталь и желѣзо состоятъ изъ чрезвычайно мелкихъ кристаллическихъ частичекъ двухъ или болѣе веществъ, изъ которыхъ каждое обладаетъ опредѣленнымъ химическимъ составомъ и опредѣленными физическими свойствами.

Но, повидимому, нѣкоторыя разновидности желѣза похожи по типу строенія не на гранитъ, а на обсидіанъ. Въ послѣднемъ, какъ въ водныхъ растворахъ, составныя части, кремнекислота, известь и т. д., не находятся между собой въ опредѣленномъ состношеніи.

При томъ различные образцы обсидіана отличаются между собой по составу не рѣзко, какъ опредѣленныя химическія соединенія, но между ними есть цѣлый рядъ постепенныхъ переходовъ. Входящія въ составъ обсидіана вещества, повидимому, растворены другъ въ другѣ, образуя какъ бы твердый растворъ; послѣдній обладаетъ всѣми отличительными признаками растворовъ, т. е. составъ его неопредѣленъ, составныхъ его частей нельзя отличить подъ микроскопомъ ни при какомъ увеличеніи и химическая связь между ними слаба.

Въ горныхъ породахъ мы встрѣчаемъ слоистое строеніе, столбчатое или базальтовое строеніе—въ видѣ столбовъ, расположенныхъ перпендикулярно къ поверхности охлажденія, раковины, покрытыя внутри свободными кристаллами, разслаиваніе и т. д.—все это можно наблюдать также и въ металлическихъ массахъ.

Изъ различныхъ микроскопическихъ составляющихъ желѣза и стали требуютъ разсмотрѣнія слѣдующія:

1. Ферритъ—микроскопическія частички почти чистаго, а можетъ быть и совершенно чистаго желѣза. Ферритъ обладаетъ магнитными свойствами, очень мягокъ и тягучъ, но сравнительно непроченъ—сопротивленіе разрыву около 45,000 фунтовъ на квадратный дюймъ. Принадлежитъ къ кубической системѣ. Очень важная составляющая медленно охлажденныхъ желѣза и стали (исключая спеціальныхъ видовъ).

Ферритъ является нормальной составляющей областей V, VI и IX (рис. 68).

Шлакъ, присутствуя въ большомъ количествѣ, какъ въ сварочномъ желѣзѣ, при прокаткѣ вытягивается въ волокна, и тогда вся масса металла принимаетъ волокнистый видъ. Но даже и въ этомъ случаѣ, металлическія или ферритовыя quasi-волокна состоятъ изъ кристаллическихъ зеренъ кубической системы (См. § 61).

146) 2. Цементитъ—опредѣленный карбидъ желѣза, Fe_3C, содержащій 6,67% углерода; очень ломокъ, тверже закаленной стали, царапаетъ стекло и полевой шпатъ, но не кварцъ (твердость=6), обладаетъ магнитными свойствами.

Углеродъ въ медленно охлажденной стали, главнымъ образомъ, или нацѣло, находится въ видѣ цементита. Слѣдовательно, одному проценту углерода соотвѣтствуютъ $(56\times3+12):12=15$ процентовъ цементита. Въ медленно охлажденномъ чугунѣ, въ отличіе отъ чугуна закаленнаго, также весь связанный углеродъ, который надо отличать отъ графита, повидимому, находится въ видѣ цементита. Цементитъ также является составляющей частью перлита и вообще играетъ большую роль въ строеніи медленно охлажденныхъ желѣза и стави, конечно, за исключеніемъ тѣхъ ихъ разновидностей, которыя почти совсѣмъ не содержатъ углерода. Углеродъ, входящій въ составъ цементита, часто называютъ цементнымъ углеродомъ или, согласно Ledebur'у, карбиднымъ углеродомъ.

Цементитъ—нормальная составляющая области VI, VIII и IX, рис. 68.

147) 3. Перлитъ.—Ложная эвтектика (§ 148), состоящая изъ чередующихся пластинокъ феррита и цементита. Исходя изъ того, что она содержитъ 0,90% углерода, въ ней должно быть по вѣсу на 6 частей феррита 1 часть цементита. Точный составъ перлита служитъ еще до сихъ поръ предметомъ спора,

и мною принято число 0,90 процента только условно, для того, чтобы имѣть точку опоры при дальнѣйшихъ выводахъ.

Медленно охлажденная сталь состоитъ главнымъ образомъ изъ конгломерата, образованнаго перлитомъ и избыточнымъ веществомъ (см. § 34); послѣднимъ является ферритъ, если сталь содержитъ менѣе 0,90% углерода, или цементитъ, если болѣе 0,90%. Парафразируя Osmond'а, можно назвать сталь «эвтектоидной», «гипер-эвтектоидной» (надъэвтектоидной) и «гипоэвтектоидной» (подъэвтектоидной), въ зависимости отъ того, содержитъ ли она точно 0,90% углерода, или болѣе, или менѣе (см. рис. 65).

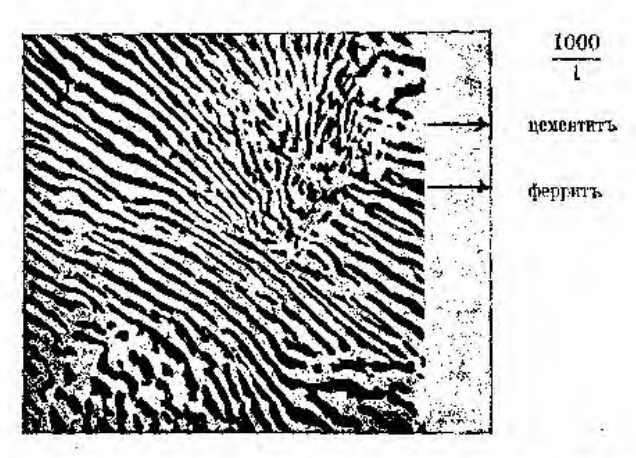


Рис. 62. Перлитъ. Сталь (углеродъ около 1%) прокованная и отожженная при 800°.

(F. Osmond, «Baumaterialienkunde», II, стр. 53 и слѣд., рис. 17).

Медленно охлажденный чугунъ состоитъ, по всей вѣроятности, главнымъ образомъ изъ конгломерата, образованнаго 1) перлитомъ съ избыткомъ феррита или цементита, въ зависимости отъ того, менѣе ли 0,90% количество связаннаго углерода или болѣе, и 2) графитомъ.

Перлитъ образуется при очень быстромъ распаденіи аустенита, а именно, когда охлажденіе проходитъ черезъ точку превращенія, Ar_1, PSP', рис. 68.

Перлитъ—нормальная составляющая часть областей VI и IX, рис. 68.

Рис. 62 изображаетъ строеніе перлита. Черныя полосы,—это ферритъ. Ферритъ самъ по себѣ бѣлаго цвѣта, но выглядитъ

здѣсь чернымъ потому, что, будучи гораздо болѣе мягкимъ, чѣмъ цементитъ, сильнѣе стирается при полировкѣ и образуетъ глубокія борозды, которыя и выглядятъ черными, благодаря тѣнямъ, бросаемымъ ихъ стѣнками.

148) Эвтектоидъ.—Перлитъ есть ложная эвтектика, «эвтектоидъ», иными словами — твердый растворъ, соотвѣтствующій низшей точкѣ превращенія. Эвтектоидъ играетъ точно такую же роль по отношенію къ этимъ превращеніямъ въ твердомъ растворѣ, твердомъ металлѣ, какую эвтектика играетъ по отношенію къ замерзанію расплавленнаго сплава. Эти превращенія могутъ идти точно такимъ же избирательнымъ путемъ, какъ и замерзаніе, и по мѣрѣ ихъ дальнѣйшаго хода твердый маточный металлъ, въ данномъ случаѣ аустенитъ, постоянно приближается къ эвтектоидному или перлитовому составу, которому отвѣчаютъ около 0,90% углерода, совершенно такъ же, какъ маточный металлъ замерзающаго сплава постепенно приближается по составу къ эвтектикѣ.

Эвтектоидъ отличается тѣми же характерными признаками, какъ и эвтектика:

1) Для любого даннаго твердаго раствора составъ его и температура превращенія постоянны и не зависятъ отъ первоначальнаго соотношенія составляющихъ частей (въ настоящемъ случаѣ отъ соотношенія между желѣзомъ и углеродомъ).

2) Составъ его не отвѣчаетъ простымъ атомнымъ соотношеніямъ, за исключеніемъ случайныхъ совпаденій (см. примѣчаніе къ § 149).

3) Онъ состоитъ изъ конгломерата отдѣльныхъ частичекъ, механически смѣшанныхъ.

149) 4. Аустенитъ и переходныя формы: мартенситъ, троститъ и сорбитъ мы разсмотримъ здѣсь вмѣстѣ.

Аустенитъ[1]) есть твердый растворъ углерода (или, быть можетъ, какого-нибудь карбида желѣза) въ гамма-желѣзѣ. Аустенитъ твердъ и ломокъ при обыкновенной температурѣ, устойчивъ при температурахъ выше критической температуры A_3, т. е. въ обла-

---

[1]) L'Austenite, au contraire, que l'on a des raisons de considérer comme non-magnétique, peut représenter les cristaux mixtes gamma intacts. Osmond, «Méthode Générale», Contribution à l'Etude des Alliages, стр. 325, 1901. Osmond называетъ аустенитомъ вещество, присутствующее въ охлажденной стали, и предполагаетъ, что оно можетъ быть идентично съ твердымъ растворомъ въ

стяхъ II, IV и VII, рис. 68, и медленно переходитъ въ перлитъ съ избыткомъ цементита или феррита, когда охлажденіе происходитъ въ областяхъ V или VIII и достигаетъ областей VI или IX, въ которыхъ, какъ уже было указано, ферритъ и цементитъ являются нормальными, а слѣдовательно и стойкими формами.

Когда аустенитъ имѣетъ эвтектоидный составъ, т. е. составъ перлита, 0,90% углерода, его иногда называютъ «гарденитомъ».

При очень быстромъ охлажденіи стали въ областяхъ IV или VII, какъ, напримѣръ, при закалкѣ ея въ водѣ, это превращеніе не успѣваетъ завершиться, такъ какъ оно требуетъ извѣстнаго промежутка времени и, конечно, не можетъ далѣе совершаться по достиженіи комнатной температуры. Вслѣдствіе этого, охлажденная сталь, вмѣсто того, чтобы состоять нацѣло изъ феррита и цементита, сохраняется въ одномъ или нѣсколькихъ изъ послѣдовательныхъ состояній, мартенсита, тростита или сорбита. Конечно, часть аустенита можетъ также сохраниться, даже не перейдя въ мартенситъ; напримѣръ, если нагрѣтую выше A_3 сталь, содержащую 1,10% или болѣе углерода, закалить въ охладительной смѣси[1]) (*SE*, рис. 68). Повидимому, здѣсь, какъ и въ другихъ случаяхъ, углеродъ задерживаетъ переходъ аустенита къ ферриту и цементиту.

Такимъ же дѣйствіемъ обладаютъ марганецъ и никкель; вслѣдствіе этого, даже безъ закалки, нѣкоторые виды марганцовой и никкелевой стали, повидимому, содержатъ по охлажденіи очень большое количество гамма-желѣза, характерной составляющей аустенита. Это сообщаетъ имъ очень цѣнныя свойства.

Разница между этими тремя переходными веществами и разница между ними и тремя основными веществами, аустенитомъ, ферритомъ и цементитомъ, можетъ быть только механической и количественной, или она можетъ быть къ тому же и по суще-

---

гамма-желѣзѣ, существующемъ въ областяхъ IV и VII. Отступая отъ опредѣленія Osmond'а, я опредѣляю аустенитъ, какъ твердый растворъ, существующій въ этихъ областяхъ, и условно принимаю, что послѣдній на самомъ дѣлѣ идентиченъ съ веществомъ, существующимъ въ закаленной высокоуглеродистой стали, и называемымъ аустенитомъ. Я надѣюсь при помощи такого рода упрощенія сдѣлать пониманіе этого предмета доступнымъ болѣе широкому кругу читателей.

[1]) Тамъ же, стр. 295.

ству. Въ первомъ случаѣ, эти переходныя вещества могутъ представлять собою по-просту механическія смѣси, состоящія изъ трехъ основныхъ веществъ и отличающіяся механически другъ отъ друга только по величинѣ и по способу смѣшенія частичекъ этихъ основныхъ веществъ, количественно же по той пропорціи, въ которой послѣднія въ составъ ихъ входятъ, совершенно подобно тому, какъ оранжевый, зеленый и фіолетовый цвѣта отличаются между собой только тѣмъ, что основные цвѣта красный, желтый и синій входятъ въ ихъ составъ въ различной пропорціи. Во второмъ случаѣ, кромѣ механической и количественной разницы, конечно, чрезвычайно важныхъ, можетъ быть разница и по существу, т. е. переходныя вещества могутъ или содержать какое либо иное основное вещество, или въ нихъ можетъ отсутствовать одно изъ вышеуказанныхъ основныхъ веществъ. Большое число фактовъ говоритъ въ пользу послѣдняго предположенія, и многіе, въ томъ числѣ и я, полагаютъ, что, напр., мартенситъ и закаленная сталь, для которой онъ характеренъ, обязаны своими свойствами присутствію бэта-желѣза; однако, такъ трудно представить неопровержимыя доказательства, мнѣнія настолько расходятся, къ тому же механическая теорія настолько удобнѣе для преподаванія и какъ рабочая гипотеза и такъ хорошо группируетъ факты, важные для практики, что ею мы и будемъ въ дальнѣйшемъ условно пользоваться (См. § 348).

Мартенситъ характеризуетъ собой закаленную сталь и, вѣроятно, закаленный чугунъ. Согласно принятой нами теоріи, мартенситъ образуется при задержкѣ превращенія въ ранней стадіи, когда уже возникло достаточное количество феррита и цементита изъ аустенита, для того, чтобы свойства послѣдняго сильно измѣнились. Слѣдовательно, мартенситъ не представляетъ собой опредѣленной стадіи превращенія аустенита, но захватываетъ значительный интервалъ превращенія. Однако существуютъ удобныя границы между мартенситомъ и аустенитомъ съ одной стороны и троститомъ съ другой, совершенно подобно тому, какъ измѣненія уклона образуютъ удобныя произвольныя границы данной горы, хотя бы она и переходила въ равнину совершенно постепенно. Въ гипер-эвтектической стали аустенитъ замѣщается главнымъ образомъ цементитомъ, въ гипо-эвтектической—ферритомъ. Рис. 64 представляетъ типичное строеніе

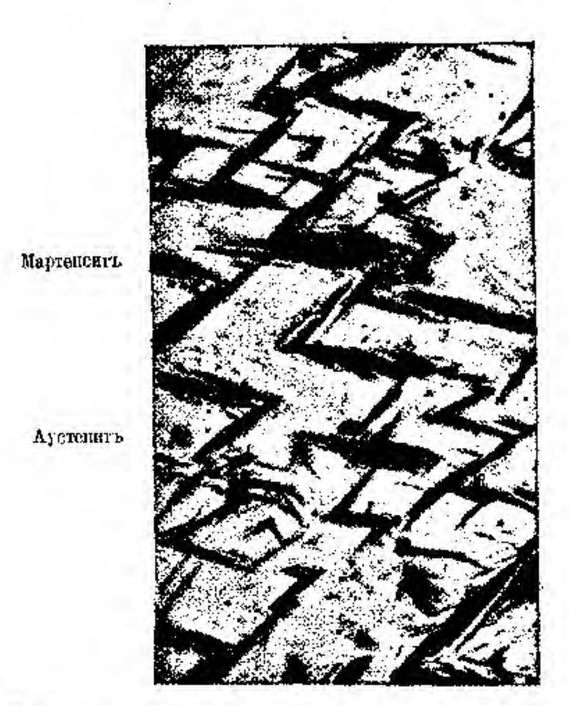


Рис. 63. Мартенситъ (черный) въ аустенитѣ (бѣлый). Сталь, содержащая около 1,50 углерода.

Закалена при 1050° Ц. въ ледяной водѣ (Osmond, «The Metallographist», II, стр. 261 и слѣд.).



Рис. 64. Мартенситъ (Osmond и Cartaud, «Annales des Mines», XIV, стр. 62, 1900; «The Metallographist», IV, стр. 236 и слѣд.).

мартенсита, насколько можно судить, соотвѣтотвующее строенію аустенита, изъ котораго онъ образуется [1]): здѣсь хорошо выражены иглы, расположенныя въ видѣ треугольниковъ и во многихъ случаяхъ пересѣкающіяся между собой, въ противуположность перлиту, слои котораго никогда не пересѣкаются. Хотя твердость какъ мартенсита, такъ и аустенита чрезвычайно сильно колеблется, не только въ различныхъ образцахъ, но даже въ одномъ и томъ же, когда мартенситъ и аустенитъ встрѣчаются вмѣстѣ [1]), однако все-таки мартенситъ, несомнѣнно, обладаетъ большей твердостью. Вообще говоря, мартенситъ тѣмъ тверже, чѣмъ больше углерода содержитъ сталь и чѣмъ быстрѣе она была охлаждена съ температуры, выше критической [2]).

Троститъ [3]), соотвѣтствующій слѣдующей стадіи превращенія, долженъ содержать менѣе аустенита и въ то же время больше феррита или цементита или и того и другого вмѣстѣ, чѣмъ мартенситъ. Повидимому, въ стадіи тростита должна находиться отпущенная сталь, т. е. сталь, принявшая строеніе мартенсита подъ вліяніемъ очень быстраго охлажденія и затѣмъ вновь нагрѣтая до такой степени, чтобы поверхность ея покрылась тонкимъ слоемъ окиси желѣза.

Сорбитъ, соотвѣтствующій послѣдней стадіи превращенія, повидимому, состоитъ главнымъ образомъ изъ перлита съ избыткомъ феррита или цементита, и можетъ быть содержитъ еще нѣкоторое количество аустенита. Составляющихъ сорбита нельзя обнаружить подъ микроскопомъ, вѣроятно, вслѣдствіе того, что хотя превращеніе почти и закончилось, но частички феррита и цементита не успѣли еще слиться въ достаточно большія массы, чтобы ихъ можно было различить.

Не безъ основанія полагаютъ, что то превосходное качество, которое можно придать стали, ведя охлажденіе ея особымъ образомъ, вызывается именно чрезвычайно мелкимъ строеніемъ,

---

[1]) У стали, содержащей 1% углерода и закаленной въ области IV, въ которой аустенитъ является нормальной составляющей, Saniter вытравленіемъ обнаружилъ структуру, очень сходную съ *изображенной на рис. 64*. «Journ. Iron and Steel Inst.», 1898, I, стр. 209.

[1]) Курбатовъ, «Revue de Métallurgie» III, стр. 177, 1905.

[2]) Osmond и Stead, «Microscopic Analysis of Metals», 1904, стр. 170—172.

[3]) Троститъ принимали за ферритъ, однако не имѣя на то достаточнаго основанія. Boynton, «Journ. Iron and Steel Inst.» 1904, I, стр. 262.

характернымъ для сорбита. Очевидно, что сорбитъ совершенно постепенно переходитъ въ троститъ съ одной стороны и въ перлитъ съ другой стороны. Магнитныя свойства и ихъ зависимость отъ этихъ стадій превращенія вкратцѣ изложены въ § 340, въ *Приложеніи 3*.

150) 5. Графитъ, характерная составляющая «сѣраго чугуна», въ которомъ его заключается отъ 2,00 до 3,50%. Графитъ представляетъ собою чистый или почти чистый углеродъ. Возникая обычно при затвердѣваніи металла, онъ образуетъ очень тонкія пластинки, часто 1/8 дюйма или болѣе въ діаметрѣ, и изогнутыя, какъ указано на рис. 60. При выдѣленіи же изъ твердаго металла ниже его точки замерзанія, графитъ, при извѣстныхъ условіяхъ, образуетъ очень мелкій порошокъ.

Графитъ представляетъ собой нормальную составляющую областей III и VII, рис. 68.

Когда желѣзо, содержащее углеродъ, при охлажденіи переходитъ изъ области VII въ области VIII и IX, весь графитъ долженъ теоретически превращаться въ цементитъ, согласно реакціи (10) графитъ $+ 3Fe = Fe_3C$. Но, благодаря медленности этой реакціи, графитъ сохраняется и можетъ быть обнаруженъ въ металлѣ въ областяхъ VIII и IX.

151) 6. Шлакъ—характерная составляющая сварочнаго желѣза, въ которомъ его содержится отъ 0,20 до 2,00%. Шлакъ состоитъ изъ силиката желѣза и содержится въ сварочномъ желѣзѣ, потому что эта разновидность желѣза изготовляется путемъ сварки размягченныхъ зеренъ желѣза, окруженныхъ массою шлака; получаемая такимъ путемъ масса не переплавляется, и вообще шлакъ не удаляется нацѣло.

152) 7. Эвтектика, образующаяся при медленномъ затвердѣваніи чугуна, т. е. любого желѣза, содержащаго, скажемъ, болѣе 2% углерода. Эвтектика содержитъ около 4,30% углерода и состоитъ изъ механической смѣси 1) аустенита, насыщеннаго, а слѣдовательно содержащаго около 2% углерода, и 2) графита. Такимъ образомъ, эвтектика содержитъ около 1,95% связаннаго или раствореннаго углерода, находящагося въ 97,6% аустенита, и 2,34% графита. Эвтектика является нормальной составляющей медленно охлажденнаго, т. е. сѣраго чугуна, который можно назвать гипер- или гипо-эвтектическимъ въ зависимости отъ того, содержитъ ли онъ болѣе или менѣе 4,30% углерода,

иначе говоря, въ зависимости отъ того, содержитъ ли онъ избытокъ графита или аустенита сверхъ эвтектической пропорціи.

153) Вычисленіе строенія или приблизительнаго состава медленно охлажденной стали и другія стехіометрическія вычисленія.—Мы уже видѣли (§ 148), что медленно охлажденная сталь состоитъ, главнымъ образомъ, изъ механической смѣси перлита съ избыткомъ феррита или цементита, въ зависимости отъ того, *ниже* ли или *выше* эвтектоидной пропорціи, составляющей около 0,90%, процентное содержаніе связаннаго углерода въ желѣзѣ. Въ первомъ случаѣ избыточнымъ веществомъ будетъ желѣзо или ферритъ, во второмъ—углеродъ или цементитъ, въ зависимости отъ точки зрѣнія.

Во избѣжаніе недоразумѣній, необходимо имѣть въ виду, что въ любой гипер-эвтектоидной стали, напримѣръ, содержащей 1,00% углерода, избыточнымъ веществомъ будетъ цементитъ, недостающимъ же желѣзо, потому что въ такой стали углерода больше, желѣза же меньше, чѣмъ должно быть согласно эвтектоидной или перлитовой пропорціи, 0,90% углерода, 99,10% желѣза. При этомъ не слѣдуетъ обращать вниманія на то, что процентное содержаніе желѣза по вѣсу въ 99 разъ больше процентнаго содержанія углерода.

Такъ какъ перлитъ самъ по себѣ есть механическая смѣсь феррита съ цементитомъ, то и медленно охлажденная сталь, будь она эвтектоидной, гипер-эвтектоидной или гипо-эвтектоидной, состоитъ въ дѣйствительности изъ феррита и цементита; при этомъ часть послѣднихъ въ отношеніи 6 : 1 расположена въ видѣ перемежающихся пластинокъ и образуетъ перлитъ, остальная же часть феррита или цементита находится въ качествѣ избыточнаго вещества. Такой избыточный ферритъ или цементитъ часто называютъ «структурно свободнымъ».

Какое количество цементита соотвѣтствуетъ 1% углерода? Присутствіе 1% углерода во всей массѣ въ состояніи цементита, Fe_3C, соотвѣтствуетъ $\frac{3 \times 56 + 12}{12} = 15$% цементита и $\frac{3 \times 56}{12} = 14$% желѣза въ этомъ цементитѣ. Здѣсь 12 и 56 обозначаютъ атомные вѣса углерода и желѣза. Наоборотъ, присутствіе 1% цементита соотвѣтствуетъ присутствію $\frac{1 \times 12}{56 \times 3 + 12} =$ $= 0{,}0667$% углерода.

Какое количество углерода содержитъ цементитъ? Формула цементита Fe_3C, указываетъ на то, что онъ содержитъ $12 \times 100 \div (56 \times 3 + 12) = 6{,}67\%$ углерода.

Каково процентное содержаніе феррита въ перлитѣ? Перлитъ содержитъ около 0,90% углерода, углеродъ же находится въ перлитѣ въ видѣ цементита, слѣдовательно перлитъ содержитъ около $0{,}90 \times 15 = 13{,}5\%$ цементита. По разности перлитъ долженъ содержать около $100 - 13{,}5 = 86{,}5\%$ феррита, или, иначе говоря, $86{,}5 \div 13{,}5 = 6{,}4$ части по вѣсу феррита на одну часть цементита. Въ виду того, что данная величина является только приблизительной, мы принимаемъ въ дальнѣйшемъ изложеніи это отношеніе равнымъ 6 : 1.

Какое количество перлита и избыточнаго феррита соотвѣтствуетъ данному процентному содержанію углерода въ гипо-эвтектоидной стали? Для примѣра возьмемъ сталь, содержащую 0,50% углерода. Мы сейчасъ видѣли, что 0,50% углерода соотвѣтствуютъ содержанію $0{,}50 \times 15 = 7{,}50\%$ цементита. Съ этимъ цементитомъ будетъ связано $7{,}50 \times 6{,}4 = 48{,}0\%$ феррита въ видѣ перлита. Такимъ образомъ, въ цѣломъ содержаніе перлита будетъ равняться $7{,}50 + 48{,}0 = 55{,}6\%$ или, скажемъ, 56%.

Остальная часть стали будетъ состоять изъ $100 - 55{,}5 = 44{,}5$ или, скажемъ, 44% свободнаго или избыточнаго феррита сверхъ феррита, содержащагося въ перлитѣ. Итакъ составъ стали, содержащей 0,50% углерода слѣдующій:

Цементита, $0{,}50 \times 15 =$	7,50
Феррита, связаннаго съ цементитомъ въ видѣ перлита, $7{,}50 \times 6{,}4$	48,00
Итого перлита	55,50
Избыточнаго или свободнаго или «структурно свободнаго» феррита по разности	44,50
	100,00

Такимъ путемъ были вычислены таблица 6 и рис. 65, причемъ тотъ же принципъ былъ приложенъ и къ бѣлымъ чугунамъ, не содержащимъ графита, которые, въ сущности, являются продолженіемъ гипер-эвтектоидныхъ сталей.

154) Итоги. Итакъ, наиболѣе важныя составляющія соединеній желѣза съ углеродомъ, сталей и чугуновъ, слѣдующія:

1) Въ медленно-охлажденныхъ стали и чугунѣ—*перлитъ*, представляющій собой конгломератъ, 2) мягкаго, тягучаго, непрочнаго *феррита* и 3) твердаго, хрупкаго *цементита* въ отношеніи 6 : 1, съ избыткомъ феррита или цементита, въ зависимости отъ того, который изъ нихъ находится въ количествѣ, превышающемъ это отношеніе; 4) въ медленно охлажденномъ чугунѣ находится кромѣ того еще *графитъ*, тѣло не-металлическое и какъ бы постороннее; 5) въ быстро-охлажденныхъ стали и чугунѣ—*аустенитъ*.

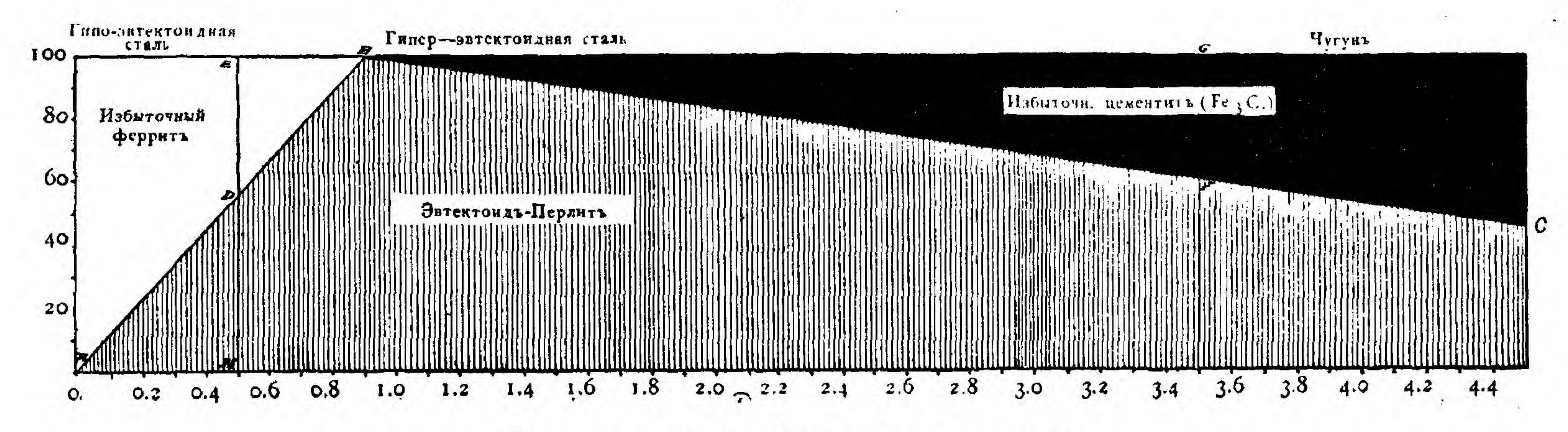
Основываясь на содержаніи въ нихъ тѣхъ или другихъ составляющихъ, можно классифицировать всѣ соединенія желѣза съ углеродомъ, всѣ виды стали и чугуна.

155) Подраздѣленіе соединеній желѣза съ углеродомъ на три группы по микроскопическому строенію.—Медленно-охлажденный металлъ можетъ состоять: 1) изъ перлита съ избыткомъ феррита или цементита; въ такомъ случаѣ всю группу, отъ 0% до 4,50% углерода, можно назвать перлитовой группой; или 2) изъ перлита, съ избыткомъ феррита или цементита, и изъ графита; въ такомъ случаѣ группу можно назвать графито-перлитовой. Въ общемъ, если содержаніе всего углерода не превышаетъ 2%, графитъ присутствуетъ въ небольшомъ количествѣ, т. е. сколько-нибудь значительное количество его находится обыкновенно только въ чугунѣ. Слѣдовательно, графито-перлитовую группу можно назвать также группой сѣраго чугуна.

Подобнымъ же образомъ, группу быстро охлажденнаго металла съ содержаніемъ углерода отъ 0% до 4,50% можно назвать аустенитовой группой.

Въ каждой изъ этихъ группъ металлъ называется «сталью», если онъ содержитъ менѣе двухъ процентовъ углерода, и «чугуномъ», если онъ содержитъ болѣе двухъ процентовъ углерода.

Теоретическій составъ, торговое названіе и главнѣйшія примѣненія членовъ этихъ трехъ группъ приведены въ таблицѣ 7. Эти группы надо разсматривать какъ типичныя, къ которымъ любой данный образецъ болѣе или менѣе приближается. Такъ, медленно охлажденная низкоуглеродистая или среднеуглеродистая сталь обыкновенно является типичнымъ представите-



Процентное содержаніе связаннаго углерода.

Рис. 65. Строеніе соединеній желѣза съ углеродомъ (Sauveur).

Ординаты *A*, *B*, *C* выражаютъ процентное содержаніе перлита, отвѣчающее процентному содержанію углерода. Отрѣзки же *ED*, *FG*, выражаютъ процентное содержаніе феррита или цементита въ гипо- и гипер-эвтектоидной стали.

Таблица 6.

Теоретическое строеіне или микроструктурный составъ медленно охлажденыхъ стали и бѣлаго чугуна, согласно Sauveur'у.

Названіе		Процент. содерж. углерода	Приблизительный процентный составъ				
			Перлитъ	Избытокъ феррита	Избытокъ цементита	Всего феррита	Всего цементита
Сталь	Низкоуглеродистая	0	0	100	0	100	0
		0,10	11	89	0	98,5	1,5
		0,20	22	78	0	97,0	3,0
	Среднеуглеродистая	0,30	33	67	0	95,5	4,5
		0,40	44	56	0	94,0	6,0
		0,50	56	44	0	92,5	7,5
		0,60	67	33	0	91,0	9,0
		0,70	78	22	0	89,5	10,5
	Высокоуглеродистая	0,80	89	11	0	88,0	12,0
		0,90	100	0	0	86,5	13,5
		1,00	98	0	2	85,0	15,0
		1,10	97	0	3	83,5	16,5
		1,20	95	0	5	82,0	18,0
		1,30	93	0	7	80,5	19,5
		1,40	91	0	9	79,0	21,0
		1,50	90	0	10	77,5	22,5
		1,60	88	0	12	76,0	24,0
		1,70	86	0	14	74,5	25,5
		1,80	84	0	16	73,0	27,0
		1,90	83	0	17	71,5	28,5
Бѣлый чугунъ		2,00	81	0	19	70,0	30,0
		2,10	79	0	21	68,5	31,5
		2,20	77	0	23	67,0	33,0
		2,30	76	0	24	65,5	34,5
		2,40	74	0	26	64,0	36,0
		2,50	72	0	28	62,5	37,5
		2,75	68	0	32	58,75	41,25
		3,00	64	0	36	55,0	45,0
		3,25	59	0	41	51,25	48,75
		3,50	55	0	45	47,5	52,5
		3,75	51	0	49	43,75	56,25
		4,00	46	0	54	40,0	60,0
		4,50	38	0	62	32,5	67,5

Таблица 7.

Классификація желѣза и стали по содержанію углерода и микроскопическому строенію [1]).

Общее сод. углерода въ проц.	Незакаленная сталь и бѣлый чугунъ или перлитовая группа.								Сѣрый чугунъ или графито-перлитовая группа							Типичная закаленная сталь или аустенитовая группа				
	Названіе	Главнѣйшія примѣненія.	Проц. сод. углерода: Въ видѣ цементита	Проц. сод. углерода: Графита	Микроскопическое строеніе, въ проц.: Ферритъ	Цементитъ	Графитъ	Шлакъ	Названіе	Главнѣйшія примѣненія	Цементитъ	Графитъ	Ферритъ	Цементитъ	Графитъ	Названіе	Главнѣйшія примѣненія	Углеродъ въ состояніи: Цементита	Углеродъ въ состояніи: Аустенита	Микроскопическое строеніе
0,05 до 0,3	Сварочное желѣзо		0,05 до 0,3		99,0 до 93,6	0,75 до 4,5		0,2 до 2,0	Отсутствуетъ или не имѣетъ значенія											
	Низкоуглеродистая или мягкая сталь	Котельная, судовая и строительная сталь	0,05 до 0,3		99,25 до 95,5	0,75 до 4,5										Низкоуглеродистая закаленная сталь	Мало примѣняется			Гл. обр. аустенитъ съ малымъ сод. углерода [3]).
0,3 до 0,8	Среднеуглеродистая сталь	Оси, валы, шины, рельсы	0,3 до 0,8		95,5 до 88,0	4,5 до 12,0	Мало или отсутствуетъ									Среднеуглеродистая закаленная (и отпущенная) сталь	Нѣкоторыя пружины, рессоры	0,3 до 0,8 гл. обр. въ видѣ аустенита		Гл. обр. аустенитъ съ среднимъ сод. углерода[3])
0,8 до 2,00	Высокоуглеродистая сталь незакаленная	Мало примѣняется	0,8 до 2,00		88,0 до 70,0	12,0 до 30,0	Обычно мало или отсутствуетъ									Высокоуглеродистая закаленная (и отпущенная) сталь	Рѣжущіе инструменты, пружины, рессоры	0,8 до 2,0 гл. обр. въ видѣ аустенита		Гл. обр. аустенитъ съ большимъ сод. углерода [3])
2,0[2]) до 4,5	Бѣлый чугунъ и закаленный чугунъ послѣ отжига	Ободы ж.-д. вагонныхъ колесъ и другія «закаленныя отливки»	1,0 до 4,5	0 до 1,0	84,0 до 32,5	15,0 до 67,5	0,0 до 1,0		Сѣрый и половинчатый чугунъ	Отливки изъ сѣраго чугуна (половинчатый мало непосредственно примѣняется).	0,0 до 3,5	1,0 до 4,0	98,0 до 47,0	0,0 до 52,0	1,0 до 4,0	Закаленный чугунъ (не отожженный)		2,0 до 4,5 гл. обр. въ видѣ аустенита		Гл. обр. пересыщенный аустенитъ (2+% углерода) [3])

[1]) Эта таблица имѣетъ цѣлью дать только самый общій обзоръ. Числовыя границы очень приблизительны, особенно въ аустенитовой группѣ. Половинчатый чугунъ мало примѣняется, за исключеніемъ того, конечно, что онъ, подобно сѣрому чугуну, примѣняется для переработки въ сварочное желѣзо и сталь.

[2]) Для упрощенія, мы принимаемъ, что общее содержаніе углерода въ чугунѣ колеблется между 2 и 4,5%. Процентное содержаніе графита принимается между 1,0 и 4,0% для сѣраго чугуна и между 0 и 1,0% для продажнаго бѣлаго чугуна; при этомъ принимается, что остальной углеродъ присутствуетъ въ видѣ Fe_3C. Сталь рѣдко содержитъ болѣе 1,5% углерода, чугунъ же рѣдко содержитъ менѣе 3% углерода. Сталь съ 1,5—2,0% углерода и чугунъ съ 2—3% углерода включены сюда, чтобы охватить всѣ соединенія желѣза съ углеродомъ.

[3]) Можно для удобства принять, что пружины, рѣжущіе инструменты и тому подобные предметы принадлежатъ къ этой группѣ, но не надо забывать, что при ихъ закалкѣ, а особенно при отпускѣ, аустенитъ сильно разлагается, переходя въ ферритъ и цементитъ. У насъ имѣется еще мало непосредственныхъ данныхъ относительно того, до какой степени идетъ это разложеніе.

лемъ перлитовой группы, за исключеніемъ тѣхъ случаевъ, когда строеніе ея измѣнено подъ вліяніемъ марганца или другихъ элементовъ; въ то же время, медленно охлажденная высокоуглеродистая сталь уже можетъ нѣсколько уклоняться отъ перлитоваго типа, благодаря содержанію въ ней небольшого количества графита.

Въ частности, сомнительно, можетъ ли быть вообще осуществленъ чисто аустенитовый типъ, ибо, какъ бы ни велось быстро охлажденіе, нѣкоторое количество аустенита должно успѣть перейти въ ферритъ и цементитъ; кромѣ того, часть углерода, даже при самомъ быстромъ охлажденіи, можетъ выдѣлиться въ видѣ графита, въ особенности, когда общее содержаніе углерода очень высоко, какъ напр. въ чугунѣ.

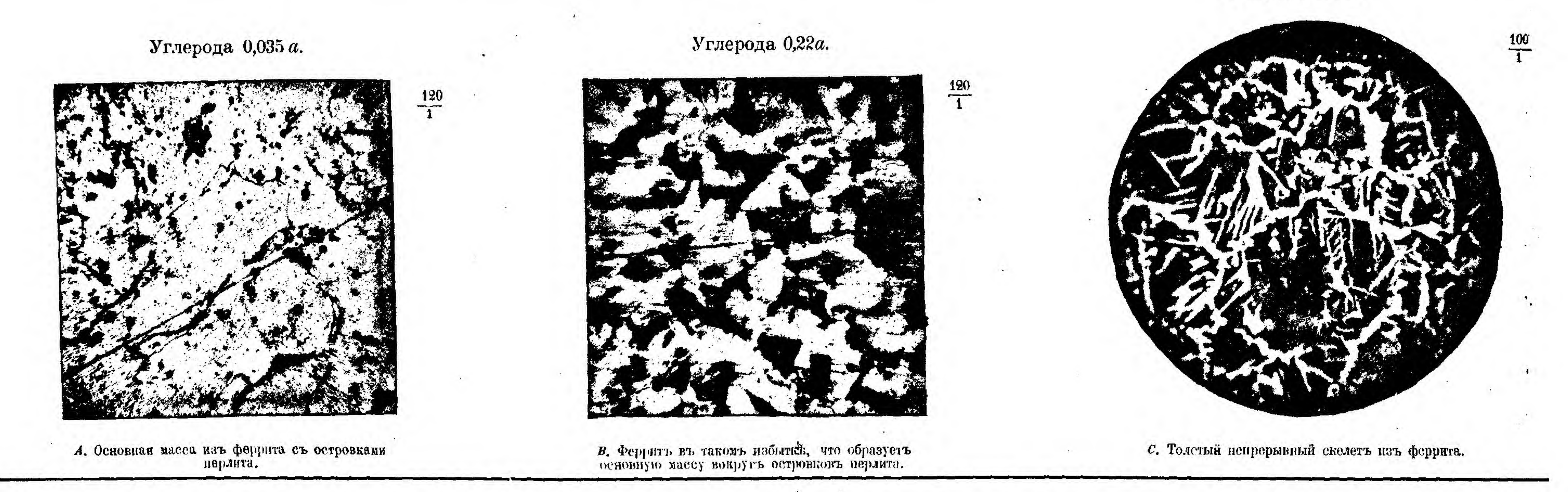
156) Перлитовая группа.—Большая часть торговой стали принадлежитъ къ перлитовой группѣ. Изъ нея по крайней мѣрѣ 95% являются сталью гипо-эвтектоидной, т. е. содержащей менѣе 0,90% углерода, а слѣдовательно состоящей изъ перлита съ избыткомъ свободнаго феррита. Такова сталь, изъ которой дѣлаются балки, трубы, стальныя колонны, заклепки, листы для котловъ и для судовыхъ корпусовъ, вагонныя оси, бандажи, рельсы, телефонная и телеграфная проволока, листы для жести и т. д.

Всѣ эти предметы состоятъ изъ смѣси 1) феррита и цементита, расположенныхъ въ видѣ чередующихся пластинокъ и образующихъ перлитъ, и 2) избыточнаго феррита. Количественное отношеніе между ферритомъ и цементитомъ можно варьировать въ зависимости отъ того, какія качества требуются отъ стали. Вообще, чѣмъ болѣе тягуча должна быть сталь, тѣмъ меньше должна она содержать углерода, т. е. тѣмъ меньше твердаго, хрупкаго цементита. Иными словами, чѣмъ больше въ стали процентное содержаніе мягкаго, тягучаго, свободнаго феррита, тѣмъ меньше процентное содержаніе перлита. Съ другой стороны, чѣмъ большая прочность и чѣмъ большій предѣлъ упругости требуются отъ стали, тѣмъ больше она должна содержать углерода, т. е. цементита, и тѣмъ меньше должно быть процентное содержаніе избыточнаго феррита.

Микроструктуру этой группы, включая гипер-эвтектоидную сталь и бѣлый чугунъ, изображаетъ рис. 66.

ГИПО-ЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ.

Толщина основной массы или скелета изъ феррита въ медленно охлажденной гипо-эвтектоидной стали увеличивается съ возрастані



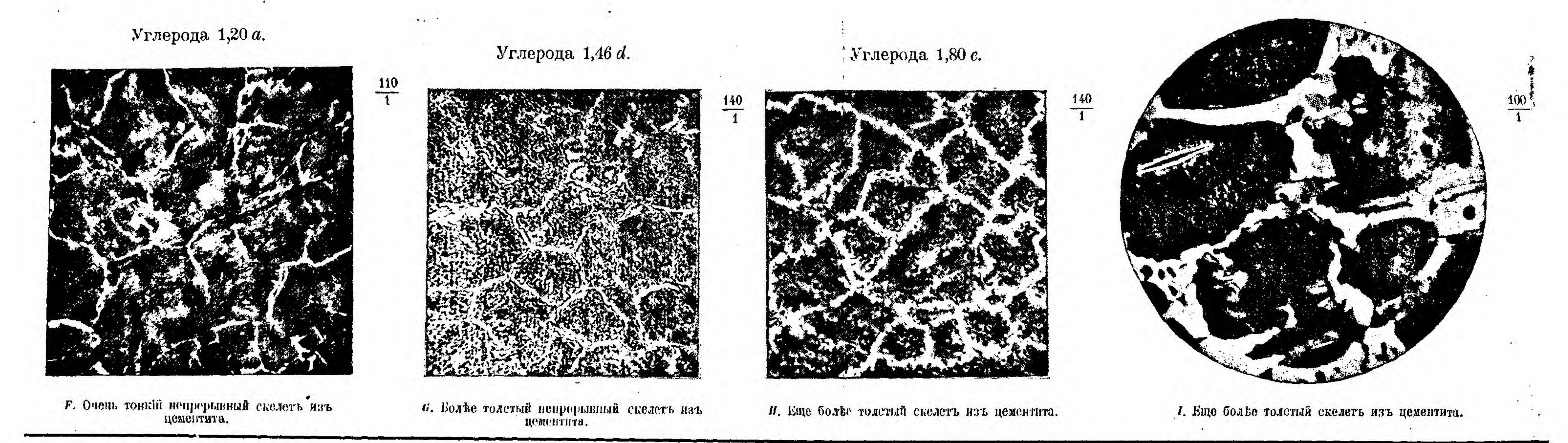
A. Основная масса изъ феррита съ островками перлита.

B. Ферритъ въ такомъ избыткѣ, что образуетъ основную массу вокругъ островковъ перлита.

C. Толстый непрерывный скелетъ изъ феррита.

ГИПЕР-ЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ И

Толщина скелета изъ цементита въ медленно охлажденной гипер-эвтектоидной стали и въ чугунѣ



F. Очень тонкій непрерывный скелетъ изъ цементита.

G. Болѣе толстый непрерывный скелетъ изъ цементита.

H. Еще болѣе толстый скелетъ изъ цементита.

I. Еще болѣе толстый скелетъ изъ цементита.

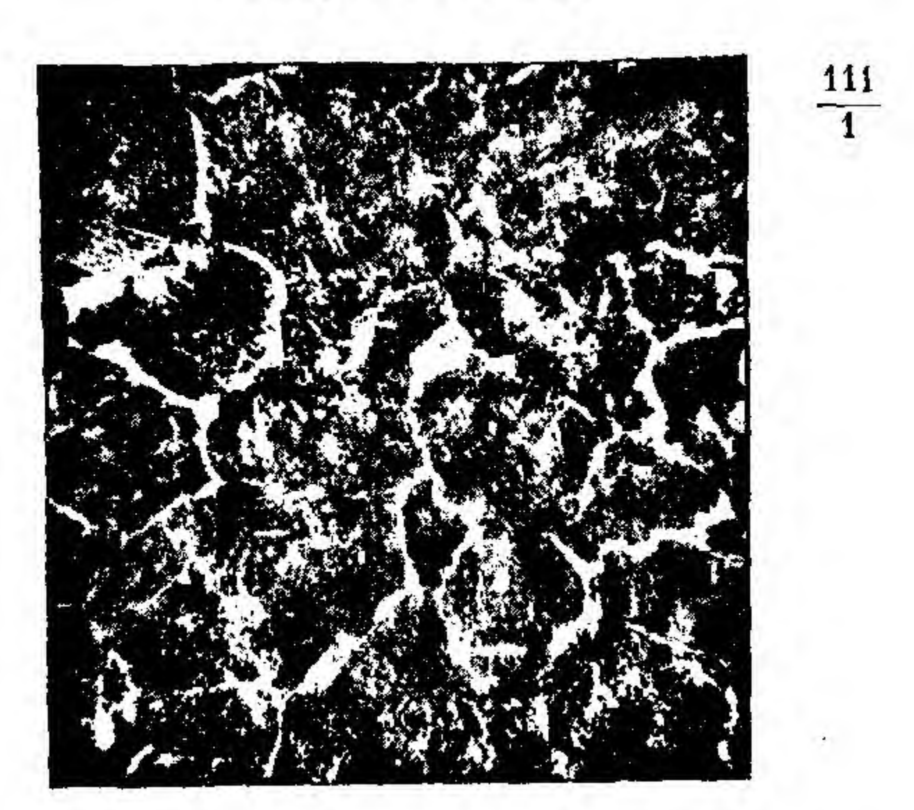
Рис. 66. Микроструктура группы перлита.

a. Wm. Campbell.—*b*. Osmond, Méthode Générale pour l'Analyse Micrographique des Aciers au Carbone, табл. 3. рис. 186.—*c*. Osmond, Baumaterialienkunde, II. стр. 53 и слѣд., рис. 17. Этотъ снимокъ представляетъ собою часть сним служить для иллюстраціи нормальной структуры эвтектоидной стали. Снимокъ этотъ приводится въ особенности потому, что онъ замѣчательно хорошъ.—*d*. Roberts-Austen, Fifth Report Alloys Rese

растаніемъ содержанія углерода.

100/1

Углерода 0,50 *a*.

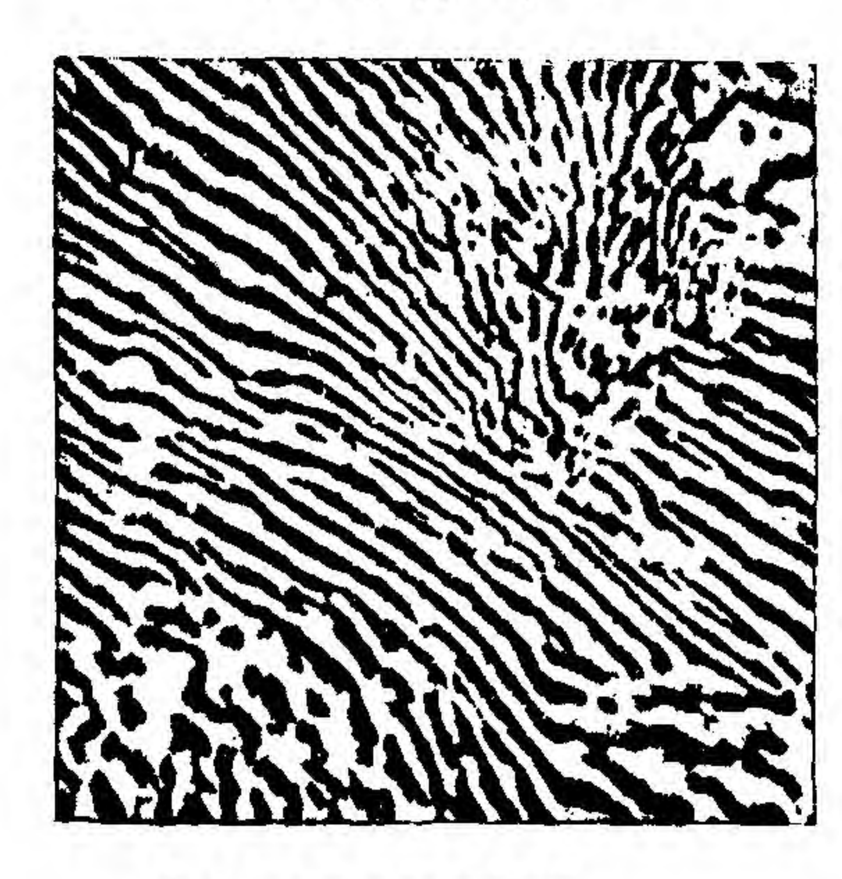


111/1

D. Тонкій непрерывный скелетъ изъ феррита.

ЭВТЕКТОИДНАЯ СТАЛЬ.

Углерода 0,90 *c*.



Болѣе чѣмъ 1000/1

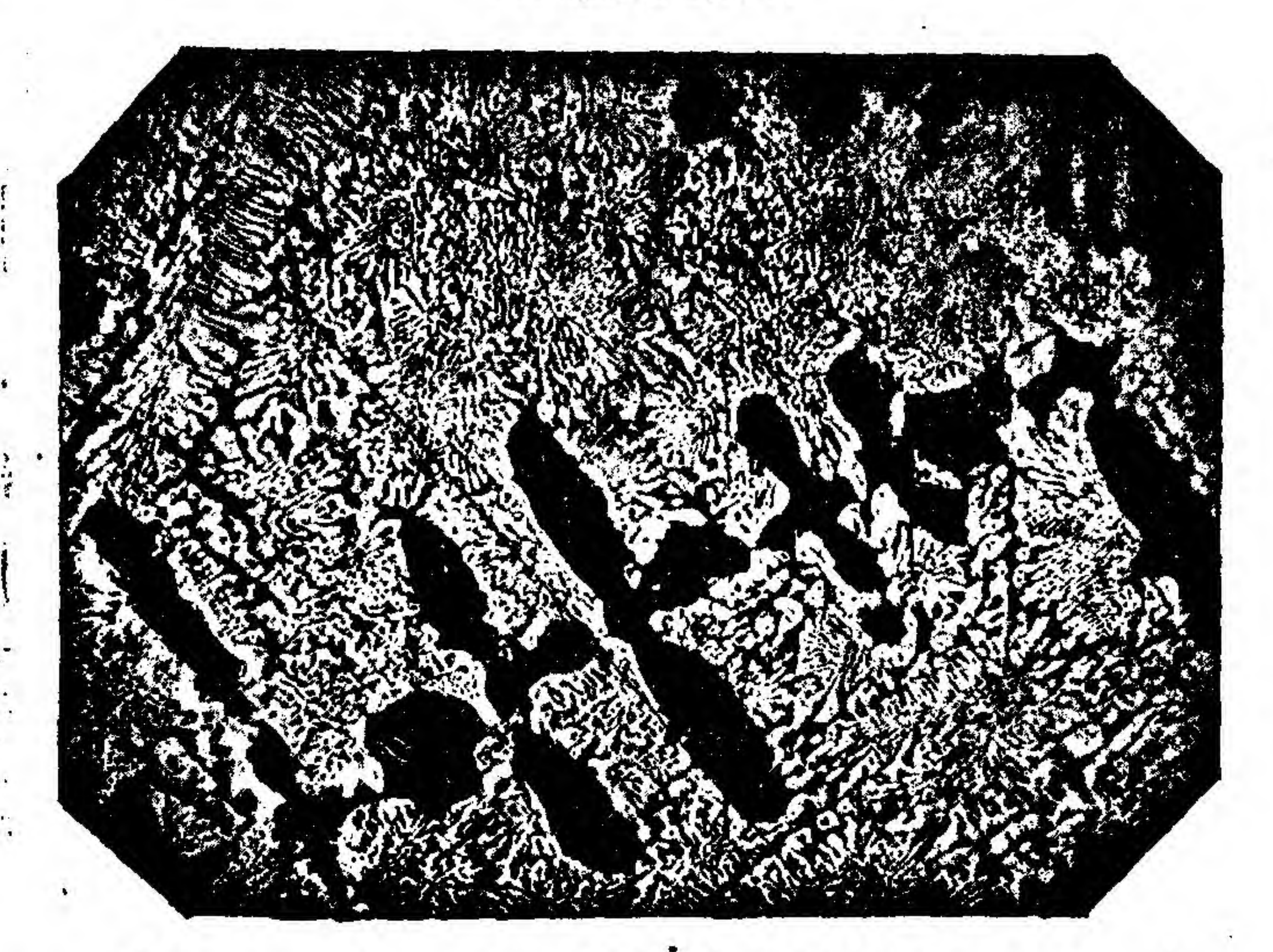
E. Одинъ только перлитъ.

Ь И ЧУГУНЪ.

чугунѣ увеличивается съ возрастаніемъ содержанія углерода.

Углерода 3,50 *a*.

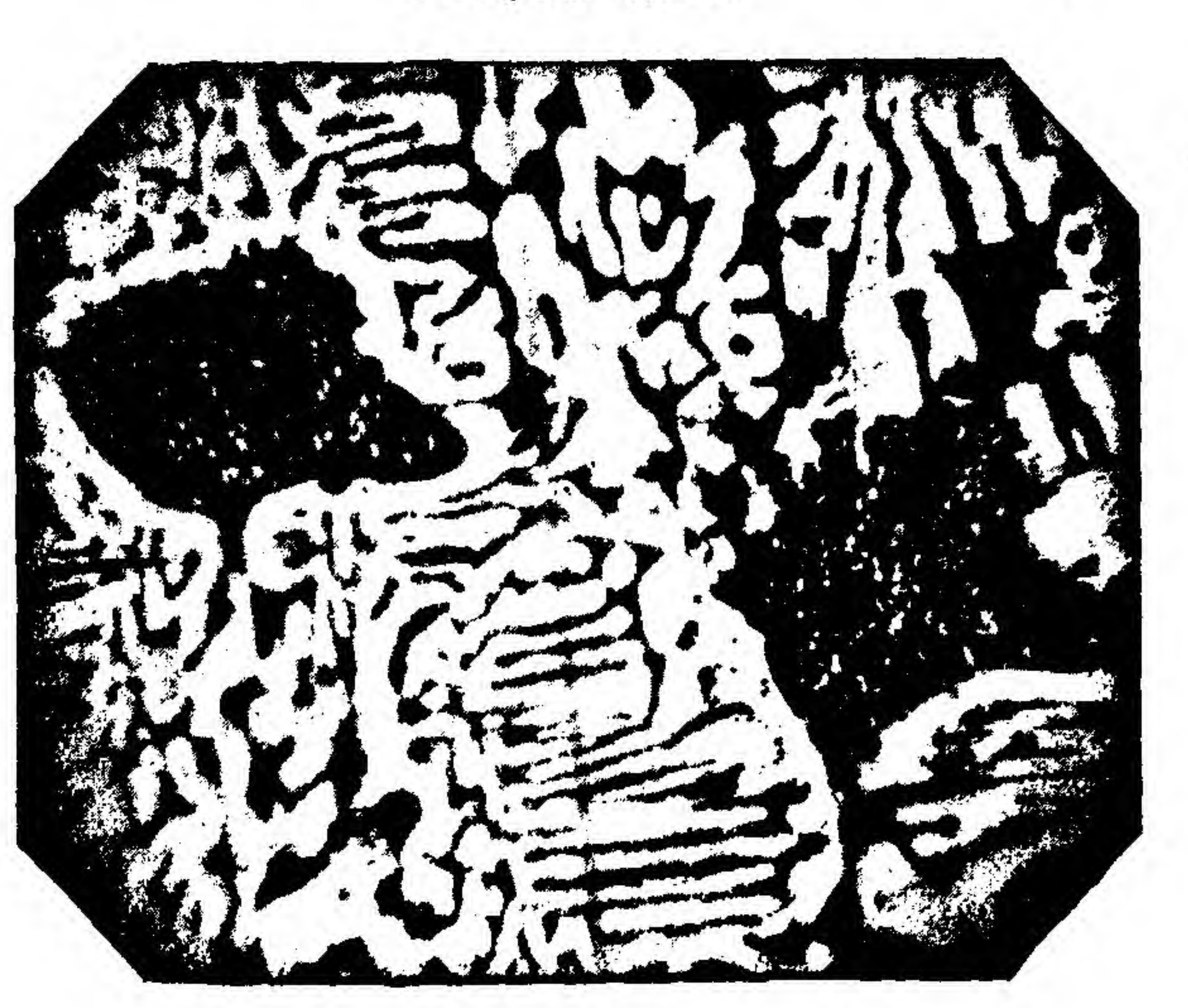
100/1



40/1

J. Рафинированный чугунъ (С. 3,5; Р. 0,01; *S.* 0,015 (См. примѣч.).

Углерода 3,50 *a*.



120/1

K. Рафинированный чугунъ. (См. примѣч.).

та.

асть снимка, сдѣланнаго Osmond'омъ съ стали съ приблизительно 1% углерода. На представленной здѣсь части совершенно отсутствуетъ сѣтка изъ цементита, и потому она можетъ
lloys Research Committee, рис. 43.— *e.* Roberts-Austen, *Fifth Report Alloys Res. Comm.*, рис. 45,—*f.* Stead. The Metallographist, стр. 263, рис. 7.

Примѣчаніе къ рис. 66.

Цѣль этого рисунка заключается въ томъ, чтобы показать, насколько микроструктура группы перлита, взятой въ цѣломъ, совпадаетъ съ строеніемъ, приблизительно представленнымъ въ таблицѣ 6 и на рис. 65.

Въ частности слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что при эвтектоидномъ составѣ, 0,90% углерода, присутствуетъ одинъ перлитъ. При большемъ же или меньшемъ содержаніи углерода появляется избыточное вещество, ферритъ, при содержаніи углерода меньше 0,90%, цементитъ при большемъ. Перлитъ темнаго цвѣта, избыточный ферритъ и цементитъ — свѣтлаго, за исключеніемъ *E*, гдѣ перлитъ занимаетъ все поле рисунка и гдѣ цементитъ бѣлаго цвѣта, а ферритъ темнаго.

При 0,50% углерода, хорошо замѣтная сѣтка изъ избыточнаго феррита окружаетъ зерна, состоящія главнымъ образомъ изъ перлита и пронизанныя тонкими нитями избыточнаго феррита, часто хорошо оріентированными. При 0,45% углерода сѣтка изъ избыточнаго феррита толще. При 0,22 углерода избыточный ферритъ образуетъ главную массу, а перлитъ нисходитъ до степени островковъ. При 0,035% углерода перлитъ проступаетъ кое-гдѣ въ массѣ феррита въ видѣ тонкихъ ниточекъ.

При 1,20% углерода тѣ 5% избыточнаго цементита, которые должны присутствовать, образуютъ тонкую сѣтку, окружающую темныя зерна перлита. Съ повышеніемъ содержанія углерода до 1,46 и 1,80% сѣтка изъ цементита утолщается.

Въ случаѣ чугуна, *I*, *J*, *K* толкованіе снимковъ, даже предположительное, гораздо труднѣе. При 3,40% углерода, на первый взглядъ, еще болѣе толстая сѣтка изъ избыточнаго цементита окружаетъ крупныя зерна перлита, повидимому, въ свою очередь пронизанныя цементитомъ.

Въ случаѣ *J* и *K* толкованіе снимковъ требуетъ чрезвычайной осторожности. Имѣющія видъ *палицъ темныя*, хорошо оріентированныя пятна можно считать за не непрерывную, рано образовавшуюся сѣтку, окружающую полосатую основную массу. Есть много основаній полагать, что эти черныя палицы представляютъ собою массы, вымерзшія въ видѣ аустенита, вдоль линіи *Aa* (рис. 68) или, точнѣе, вдоль линіи въ родѣ *mea*, и что бѣлыя пятна, которыя внутри ихъ можно видѣть при большемъ увеличеніи (*K*), представляютъ собою избыточный цементитъ, возникшій въ нихъ при пересѣченіи области VIII. Далѣе, что полосатая основная масса представляетъ собою пересыщенный аустенитъ, замерзшій при пересѣченіи линіи *aB* и распавшійся на перлитъ и избытокъ цементита при пересѣченіи области VIII. Бѣлыя полосы этой основной массы должны состоять изъ избыточнаго цементита (который, согласно таблицѣ 6, долженъ составлять между 50 и 60% этой массы), а темныя полосы изъ перлита, составляющихъ котораго при настоящихъ увеличеніяхъ не представляется возможнымъ различить.

Количественныя соотношенія между ферритомъ и цементитомъ, а также между ними и перлитомъ для перлитовой группы приведены въ таблицѣ 6; графически они представлены на рис. 65.

157) Графито-перлитовая группа или группа сѣраго чугуна.—Большинство чугуновъ, примѣняемыхъ въ техникѣ въ видѣ отливокъ, принадлежитъ къ графито-перлитовой группѣ. Такой чугунъ обыкновенно содержитъ около 4% углерода, при чемъ отъ 2 до 3,50% приходится на долю графита, остальное же количество на долю цементита или «связаннаго углерода». Къ этой группѣ принадлежатъ всѣ чугунныя отливки, напримѣръ машинныя части, трубы, колонны и т. п.

Вообще, чѣмъ мягче долженъ быть чугунъ, чѣмъ легче онъ долженъ поддаваться рѣжущимъ инструментамъ и чѣмъ лучше онъ долженъ противустоять ударамъ и толчкамъ, тѣмъ меньше онъ долженъ содержать связаннаго углерода, т. е. цементита, и тѣмъ больше феррита; иначе говоря, тѣмъ больше отношеніе феррита къ цементиту должно приближаться къ существующему у низкоуглеродистой стали.

Производитель чугуна обычно смотритъ на этотъ вопросъ съ иной точки зрѣнія. Если общее содержаніе углерода въ чугунѣ приблизительно постоянно, какъ это обычно бываетъ, тогда меньшему содержанію цементита должно отвѣчать большее содержаніе графита. Чѣмъ мягче и болѣе ковокъ чугунъ, тѣмъ больше онъ содержитъ графита. Отсюда производитель заключаетъ, что причиной, обусловливающей мягкость чугуна, является графитъ. Но это только противуположная нашей точка зрѣнія на одинъ и тотъ же фактъ. Вопросъ становится гораздо яснѣе, если мы взглянемъ на него иначе и скажемъ, что мягкость и ковкость даннаго чугуна вызываются присутствіемъ мягкаго и ковкаго феррита и мягкаго графита, взамѣнъ твердаго и хрупкаго цементита. Съ этой точки зрѣнія вопросъ абсолютно ясенъ. Съ противоположной же туманенъ (См. §§ 331—336).

Не будемъ дальше остановливаться на этомъ вопросѣ [1]), замѣтимъ только, что группа сѣраго чугуна или графито-перлитовая, въ сущности, есть не что иное, какъ перлитовая группа,

[1]) Подробнѣе этотъ вопросъ разобранъ авторомъ въ «Proceedings of the American Society for Testing Materials», II, стр. 246, 1902.

или группа стали и бѣлаго чугуна плюсъ графитъ. Точно также отдѣльный образчикъ сѣраго чугуна можно разсматривать, какъ основную массу изъ стали или чугуна, въ которой включены крупинки не-металлическаго и какъ бы посторонняго тѣла, графита.

158) Провѣрка даннаго воззрѣнія.—Такъ какъ такого рода воззрѣніе на строеніе сѣраго чугуна очень существенно, то мы разсмотримъ, насколько оно согласуется съ внѣшнимъ видомъ излома такого чугуна. Сѣрый чугунъ обычно содержитъ около 4% углерода, при чемъ около 3% по вѣсу или 10% по объему находятся въ видѣ крупинокъ графита, довольно значительныхъ по объему; ихъ діаметръ часто достигаетъ 1/8 дюйма, и они образуютъ въ желѣзѣ почти непрерывный остовъ. Если сломать кусокъ такого чугуна, изломъ, слѣдуя мѣсту наименьшаго сопротивленія, пройдетъ по поверхности крупинокъ графита, а не черезъ металлическую основную массу. Вслѣдствіе этого на изломѣ будетъ виденъ одинъ графитъ. Что графитъ на изломѣ представляетъ собой только наслоеніе, можно ясно видѣть, если обработать изломъ проволочной щеткой. Крупинки графита такимъ путемъ легко удаляются, и подъ ними выступаетъ бѣлая металлическая основная масса, конечно, до извѣстной степени загрязненная приставшими къ ней остатками графита, подобно тому, какъ при очинкѣ карандаша на пальцахъ остаются слѣды графита, если сдуть съ нихъ образовавшійся при этомъ порошокъ.

Разумѣется, нахожденіе такого ломкаго посторонняго вещества, какъ графитъ, въ основной массѣ изъ стали должно ослаблять эту сталь и сообщать ей въ свою очередь ломкость. Этимъ и обусловливается ломкость чугуна. Но, съ другой стороны, чугунъ имѣетъ то преимущество, что онъ гораздо дешевле стали, такъ какъ всѣ виды стали получаются путемъ его переработки; кромѣ того, чугунъ, благодаря легкоплавкости, текучести и способности расширяться при затвердѣваніи, требуетъ меньшихъ затратъ при отливкѣ, чѣмъ сравнительно менѣе легкоплавкая сталь; отливки изъ послѣдней гораздо труднѣе, ковка же или прокатка требуетъ большой затраты силы и топлива для нагрѣванія ея до требуемой при этомъ температуры.

159) Аустенитовая группа.—Къ этой группѣ принадлежатъ всѣ виды закаленной, а также закаленной и затѣмъ отпущен-

ной стали; таковы рѣжущіе инструменты для металла, дерева и другихъ веществъ, пружины, рессоры, наконечники бронебойныхъ снарядовъ, поверхностный слой брони и т. п.

Твердость и хрупкость въ аустенитовой группѣ увеличиваются съ повышеніемъ содержанія углерода совершенно такъ же, какъ въ перлитовой группѣ съ повышеніемъ содержанія цементита или связаннаго углерода. Слѣдовательно, можно обобщить

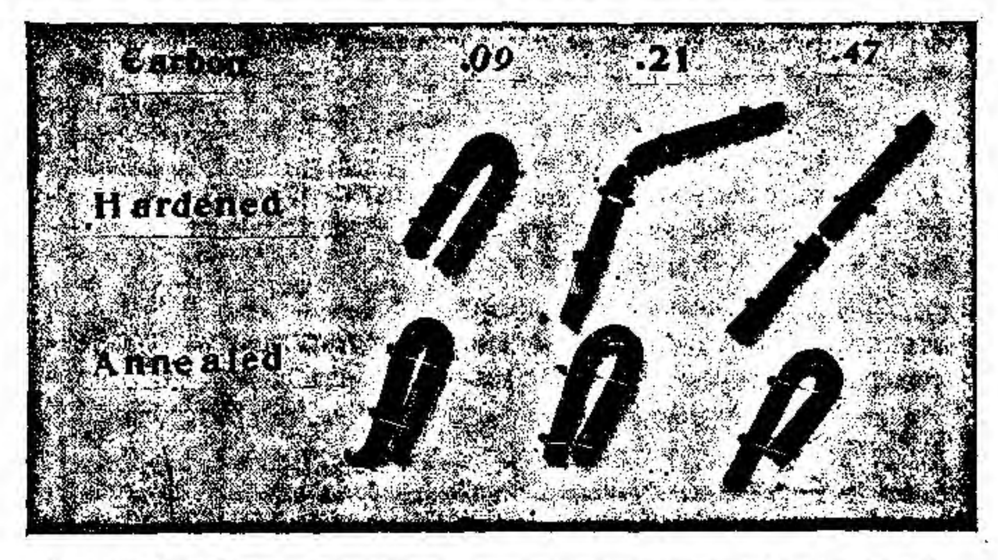


Рис. 67. Способность закаливаться повышается съ увеличеніемъ содержанія углерода.

(Hardened—закаленная сталь; Annealed—отожженная).

это явленіе, сказавъ, что во всѣхъ этихъ трехъ группахъ твердость и хрупкость увеличиваются съ повышеніемъ содержанія связаннаго углерода. Однако, въ аустенитовой группѣ повышеніе содержанія углерода оказываетъ гораздо большее вліяніе, чѣмъ въ перлитовой группѣ. Такъ, быстрое охлажденіе оказываетъ очень слабое вліяніе на твердость и тягучесть низкоуглеродистой стали, содержащей, скажемъ, 0,10% углерода. Иное дѣло сталь, содержащая, скажемъ, 0,50% углерода. Охлажденная медленно, т. е. находящаяся въ состояніи перлита, она можетъ быть согнута вдвое, безъ того чтобы сломаться, будучи же закалена, т. е. находясь въ состояніи аустенита, она ломается и не можетъ быть сколько нибудь замѣтно согнута. Это явленіе показано на рис. 67.

Въ значительной степени сказанное выше приложимо также къ твердости стали въ собственномъ смыслѣ, т. е. къ способности противустоять истиранію и зазубриванію. Медленно охлажденная сталь, т. е. въ состояніи перлита, обладаетъ твердостью, отвѣчающей ея тягучести. Конечно, она труднѣе поддается дѣйствію напилка, чѣмъ низкоуглеродистая сталь, хотя разница между ними и не особенно замѣтна. Но, тогда какъ быстро охлажденная очень низкоуглеродистая сталь, по твердости сколько бы то ни было замѣтно не отличается отъ медленно охлажденной, высокоуглеродистая сталь (напр. содержащая 1,25% углерода), будучи быстро охлаждена, становится настолько твердой, что ею можно царапать стекло.

Однимъ словомъ, способность закаливаться, какъ бы ее ни измѣрять, твердостью или хрупкостью, увеличивается съ повышеніемъ содержанія углерода.

160) Примѣненія стали, принадлежащей къ группѣ аустенита.—Хотя примѣненія стали, принадлежащей къ аустенитовой группѣ, очень многочисленны и разнообразны, однако потребленіе ея незначительно по сравненію съ потребленіемъ огромнаго количества продуктовъ, принадлежащихъ къ перлитовой и графито-перлитовой группѣ. Происходитъ это не только отъ того, что быстрое охлажденіе, требующее большой осторожности, дорого обходится, но также потому, что при этомъ металлъ становится хрупкимъ, какъ вслѣдствіе пріобрѣтаемыхъ имъ свойствъ, такъ и тѣхъ натяженій, которыя вызываетъ въ немъ быстрое, а слѣдовательно и неравномѣрное охлажденіе. Въ силу этихъ причинъ, сталь, принадлежащая къ аустенитовой группѣ, примѣняется только въ тѣхъ случаяхъ, когда требуется или большая твердость (рѣжущіе инструменты, снаряды, броня) или высокій предѣлъ упругости (пружины). Во многихъ случаяхъ, противъ хрупкости, сопровождающей твердость, прибѣгаютъ къ тому, что приводятъ въ состояніе аустенита только часть даннаго предмета, остальную же часть его, неразрывно съ первой связанную, оставляютъ въ состояніи тягучаго перлита. Такъ, лезвіе рѣзца твердо и хрупко, благодаря тому, что оно находится въ состояніи аустенита, вслѣдствіе быстраго охлажденія, т. е. закалки. Для того же чтобы оно не могло сломаться, его неразрывно соединяютъ съ остальной частью рѣзца, остающейся, благодаря особымъ температурнымъ условіямъ, въ со-

стояніи перлита ковкой и сравнительно съ малымъ внутреннимъ натяженіемъ. То же самое можно сказать и относительно закаленнаго конца снаряда, неразрывно соединеннаго съ незакаленнымъ тѣломъ его. Равнымъ образомъ, закаленная поверхностная часть броневыхъ плитъ неразрывно соединяется съ подкладкой изъ низкоуглеродистой стали, которая даже въ состояніи аустенита обладаетъ сравнительной ковкостью.

161) Аустенитъ никогда не бываетъ чистымъ. — Правда, надо сказать, что данные предметы собственно находятся въ промежуточномъ состояніи между перлитомъ и аустенитомъ, т. е. они никогда не состоятъ исключительно изъ чистаго неизмѣненнаго аустенита. Но это указывалось уже въ § 149.

Даже въ закаленныхъ предметахъ, примѣняемыхъ безъ отпуска, аустенитъ всегда болѣе или менѣе измѣненъ, потому, что, какъ бы ни было быстро охлажденіе, оно не состояніи предотвратить совершенно переходъ его въ сторону перлита.

Въ обыденныхъ предметахъ, какъ пружины, рессоры и большинство рѣжущихъ инструментовъ, которые послѣ закалки слегка отпускаются при помощи слабаго нагрѣванія, переходъ аустенита въ сторону перлита еще болѣе выраженъ. Тѣмъ не менѣе, мы можемъ разсматривать всѣ эти предметы, какъ принадлежащіе въ широкомъ значеніи къ группѣ аустенита, потому что свойства ихъ, главнымъ образомъ, обусловливаются аустенитомъ.

162) Кривыя замерзанія и кривыя превращенія соединеній желѣза съ углеродомъ. Діаграмма аустенитъ-цементитъ.—Перегибы кривыхъ охлажденія, которыми мы занимались въ главѣ II, вызываются выдѣленіемъ тепла или, другими словами, измѣненіями энергіи при переходѣ изъ расплавленнаго въ твердое состояніе. Но, какъ уже было указано въ § 12, всякое химическое или физическое измѣненіе въ металлѣ послѣ затвердѣванія должно сопровождаться выдѣленіемъ (рѣже поглощеніемъ) тепла, которое точно также будетъ вызывать перегибы на кривыхъ охлажденія. Такимъ путемъ, автоматически, будутъ отмѣчаться не только ходъ затвердѣванія, но и всѣ измѣненія въ строеніи, которыя происходятъ при охлажденіи, начиная съ точки замерзанія. Это приводитъ насъ къ діаграммѣ Roberts-Austen (рис. 68), на которой одновременно представлены кривыя замерзанія и кривыя превращеній соединеній желѣза съ углеродомъ, а

равнымъ образомъ и строеніе, соотвѣтствующее при различныхъ температурахъ различному содержанію углерода.

Въ общихъ чертахъ эта діаграмма состоитъ изъ двухъ группъ кривыхъ, имѣющихъ знакомый намъ видъ подчеркнутыхъ *V*; кривыя такого типа, какъ мы уже знаемъ, обыкновенно представляютъ замерзаніе сплавовъ, образующихъ эвтектику.

Первая или верхняя группа, *ABC*, *aBc*, представляетъ дѣйствительно замерзаніе серіи сплавовъ, образующихъ эвтектику, ибо такой именно серіей и являются соединенія желѣза съ углеродомъ.

Эвтектика содержитъ около 4,30% углерода, при чемъ ея составляющими являются 1) твердый растворъ углерода въ желѣзѣ, аустенитъ, и 2) цементитъ. Аустенитъ нормально долженъ былъ бы быть насыщенъ углеродомъ, т. е. быть насыщеннымъ твердымъ растворомъ. Для насыщенія его требуется около 2,00% углерода.

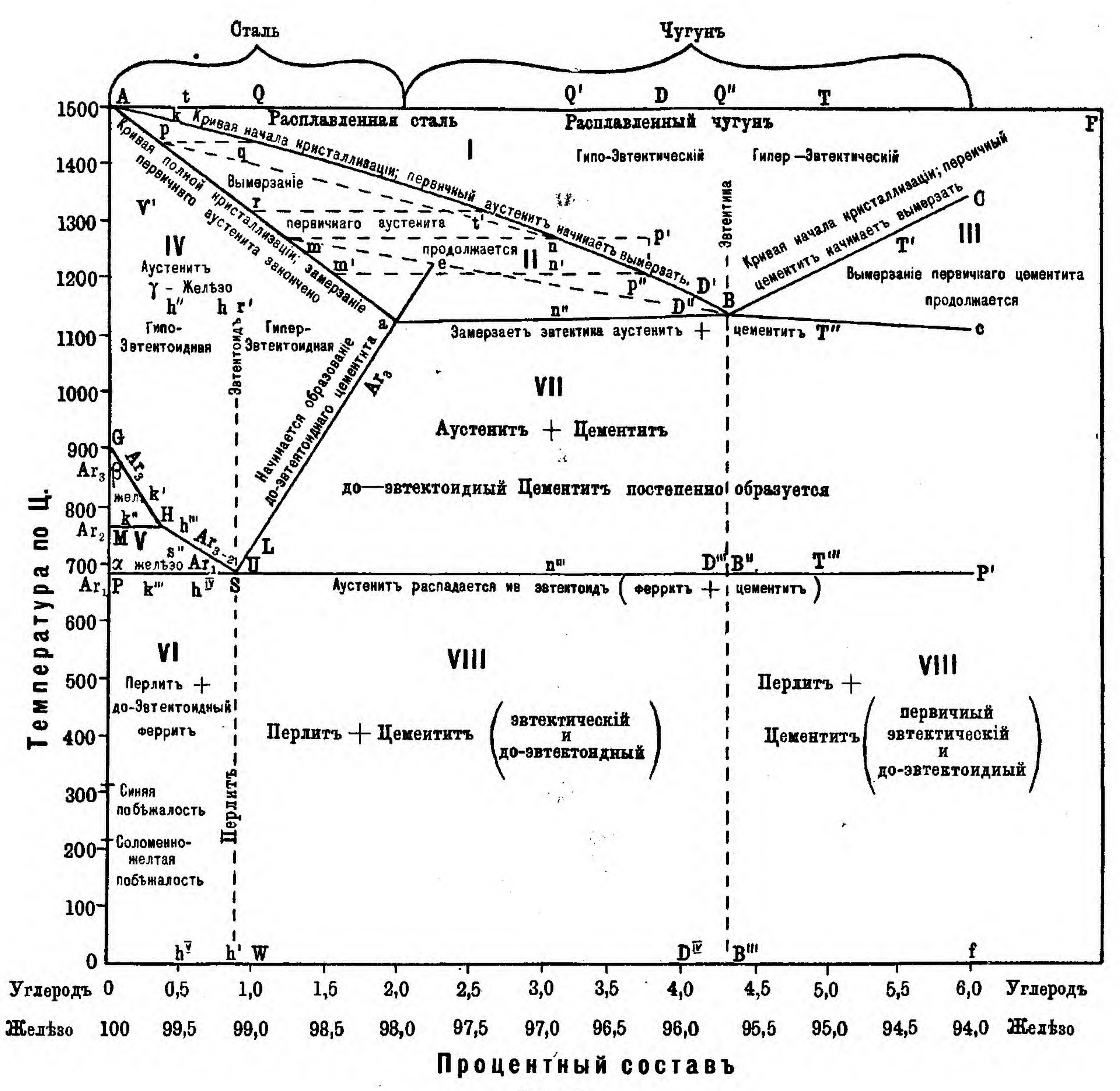
Sac, очевидно, представляетъ собою отрѣзокъ кривой насыщенія, или критической кривой, и указываетъ предположительно, сколько процентовъ углерода требуется при различныхъ температурахъ для насыщенія аустенита.

Вторая или нижняя группа, *GHSa*, *PSP'* представляетъ параллельно идущее превращеніе въ твердомъ металлѣ, которое имѣетъ близкую аналогію съ замерзаніемъ сплава, образующаго эвтектику. Иными словами, при замерзаніи серіи сплавовъ, образующихъ эвтектику, возникаетъ рядъ конгломератовъ, состоящихъ изъ эвтектики и избыточнаго вещества; точно также, при охлажденіи превращеніе въ твердомъ металлѣ заставляетъ твердый растворъ, аустенитъ, распасться съ образованіемъ конгломерата, состоящаго изъ ложной эвтектики или «эвтектоида» и избыточнаго вещества. Какъ при замерзаніи сплава, образующаго эвтектику, переходъ изъ расплавленнаго раствора въ твердый конгломератъ выражается группой кривыхъ, имѣющихъ видъ подчеркнутаго *V*, точно также и превращеніе въ твердомъ растворѣ, выражается группой крвыхъ, имѣющихъ тотъ же видъ.

Эвтектоидъ или ложная эвтектика есть ничто иное, какъ перлитъ, составляющія котораго ферритъ, *Fe*, и цементитъ, Fe_3C.

Значеніе обозначеній Ar_1, Ac_1 и т. д. приведено въ § 193.

На настоящей діаграммѣ, какъ и на подобныхъ ей, относящихся къ инымъ серіямъ сплавовъ, представлены точки замер-



Сталь
Чугунъ
Расплавленная сталь
Расплавленный чугунъ
Гипо-Эвтектическій
Гипер—Эвтектическій
Кривая начала кристаллизаціи; первичный аустенитъ начинаетъ вымерзать.
Кривая полной кристаллизаціи; замерзаніе первичнаго аустенита закончено
Вымерзаніе первичнаго аустенита продолжается
Кривая начала кристаллизаціи; первичный цементитъ начинаетъ вымерзать
Вымерзаніе первичнаго цементита продолжается
Эвтектика
Аустенитъ γ - Желѣзо
Гипо-Эвтектоидная
Гипер-Эвтектоидная
Эвтектоидъ
Начинается образованіе до-эвтектоидного цементита
Замерзаетъ эвтектика аустенитъ + цементитъ
Аустенитъ + Цементитъ
до—эвтектоидный Цементитъ постепенно образуется
Аустенитъ распадается на эвтектоидъ (ферритъ + цементитъ)
Перлитъ + до-Эвтектоидный ферритъ
Синяя побѣжалость
Соломенно-желтая побѣжалость
Перлитъ
Перлитъ + Цементитъ (эвтектическій и до-эвтектоидный)
Перлитъ + Цементитъ (первичный эвтектическій и до-эвтектоидный)
β желѣзо
α желѣзо
Температура по Ц.
Углеродъ 0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 Углеродъ
Желѣзо 100 99,5 99,0 98,5 98,0 97,5 97,0 96,5 96,0 95,5 95,0 94,5 94,0 Желѣзо
Процентный составъ

Рис. 68.

занія, а не точки плавленія, и точки превращенія при охлажденіи, а не при нагрѣваніи. Теоретически, кривыя, получаемыя при охлажденіи, должны были бы совпадать съ получаемыми при нагрѣваніи. Однако, замедленіе вызываетъ значительное расхожденіе (См. § 164).

Въ общемъ, значеніе и положеніе кривыхъ направо отъ ординаты, соотвѣтствующей 1,50% углерода, еще точно не установлены.

163) Положеніе границы между сталью и чугуномъ и ея отношеніе къ точкѣ насыщенія твердаго аустенита.—Подобно тому, какъ между странами желательны естественныя границы, какъ напр. горные хребты или водныя пространства, точно также желательно, чтобы и наша классификація желѣза и стали была основана, насколько это возможно, на естественныхъ подраздѣленіяхъ, вмѣсто того, чтобы быть совершенно произвольной. Въ этой книгѣ 2 процента углерода были приняты за произвольную границу между сталью и чугуномъ; до извѣстной степени это отвѣчаетъ и принятымъ въ торговлѣ обозначеніямъ. Но эта произвольная граница имѣетъ еще то преимущество, что она находится весьма близко къ естественной линіи раздѣла между областью, въ которой нормально отсутствуетъ эвтектика, и областью, гдѣ она нормально присутствуетъ. Какъ только положеніе этой естественной линіи раздѣла будетъ опредѣлено съ достаточной точностью, будетъ весьма удобно принять ее за границу между сталью и чугуномъ. Тогда къ стали будутъ относиться всѣ соединенія желѣза съ углеродомъ, нормально не содержащія эвтектики, къ чугуну же—всѣ нормально ее содержащія.

Такого рода подраздѣленіе весьма привлекательно, но приложимо только къ чистымъ соединеніямъ желѣза съ углеродомъ, такъ какъ у нечистыхъ соединеній граница области, содержащей эвтектику, можетъ очень сильно передвигаться въ зависимости отъ измѣненій въ содержаніи примѣсей. Въ такихъ случаяхъ мы можемъ воспользоваться для проведенія границы другимъ, менѣе рѣзкимъ признакомъ, на который уже было указано въ § 142; а именно, различіемъ между сталями, приближающимися по своей природѣ къ чугуну, и чугунами, приближающимися по своей природѣ къ стали, будетъ то, что сталь должна быть ковкой по крайней мѣрѣ въ одномъ температур-

номъ интервалѣ, тогда какъ чугунъ не обладаетъ ковкостью ни при какой температурѣ.

164) Общее подраздѣленіе; строеніе; замедленіе.—Данная діаграмма подраздѣляется кривыми замерзанія и кривыми превращенія на восемь важныхъ областей. Согласно принятымъ въ настоящее время теоріямъ, каждой изъ областей нормально должно отвѣчать извѣстное строеніе. По мѣрѣ того, какъ металлъ, охлаждаясь, переходитъ отъ одной области къ другой, его строеніе должно измѣняться, превращаясь изъ строенія, теоретически отвѣчающаго той области, которую онъ оставляетъ, въ строеніе, отвѣчающее той области, въ которую онъ вступаетъ. Но вслѣдствіе замедленія или молекулярной инерціи, превращенія, которыя должны были бы происходить при переходѣ такой границы, могутъ отчасти задержаться или даже вовсе не наступить. Другими словами, эти превращенія требуютъ извѣстнаго времени, особенно если они происходятъ въ твердомъ металлѣ. При этомъ низкая температура дѣйствуетъ на нихъ замедляющимъ образомъ.

Такимъ образомъ, если охлажденіе проходитъ черезъ извѣстную область быстро, превращеніе, соотвѣтствующее этой области, можетъ быть неполнымъ; если же низкая температура достигается очень быстро, это превращеніе можетъ быть пріостановлено и остаться на этой стадіи навсегда.

Это замедленіе играетъ очень важную роль, такъ какъ мы въ сильной степени обязаны ему возможностью придавать данному образцу стали или чугуна различныя свойства, примѣняя различные методы тепловой обработки. Эти методы основаны главнымъ образомъ на томъ, что вызываютъ желательную степень замедленія или заставляютъ идти задержанную реакцію, поставивъ ее въ благопріятныя условія. Впослѣдствіи мы увидимъ, что это справедливо по отношенію къ закалкѣ, отпуску и отжигу стали, къ закалкѣ и отжигу чугуна и къ производству отливокъ изъ ковкаго чугуна. Однимъ изъ слѣдствій этой склонности къ замедленію является то, что превращенія, представленныя на діаграммѣ (рис. 68), происходятъ при охлажденіи при температурахъ значительно болѣе низкихъ, чѣмъ этого требуетъ теорія; въ частности, они происходятъ при охлажденіи при болѣе низкихъ температурахъ, чѣмъ при нагрѣваніи. При нагрѣваніи замѣчается также нѣкоторое замедленіе, но обыкновенно оно бываетъ гораздо менѣе рѣзко выражено.

Вслѣдствіе этого, кривыя превращенія, полученныя путемъ наблюденій при охлажденіи, могутъ быть расположены ниже полученныхъ при нагрѣваніи. Дѣйствіе нѣкоторыхъ постороннихъ элементовъ, какъ вольфрамъ, молибденъ, никкель и марганецъ, повидимому, состоитъ въ томъ, что они понижаютъ температуру, при которой происходятъ эти превращенія; этимъ и объясняется въ значительной степени сильное вліяніе указанныхъ элементовъ.

Теперь мы перечислимъ эти восемь областей и въ то же время укажемъ на теоретически отвѣчающее каждой изъ нихъ строеніе и на тѣ превращенія, которыя теоретически должны происходить при переходѣ черезъ нихъ.

Будутъ также даны уравненія, выражающія эти превращенія; эти уравненія сгруппированы въ таблицѣ 8.

165) Область I, *ABCF*. Расплавленный растворъ углерода въ желѣзѣ.—Нижней границей этой области служитъ верхняя кривая замерзанія *ABC*; она представляетъ расплавленную сталь и расплавленный чугунъ, которые суть ничто иное какъ расплавленный растворъ углерода въ желѣзѣ. Граница между ними произвольна. Для упрощенія мы примемъ, что при плавленіи желѣза, содержащаго графитъ, послѣдній теряетъ свои свойства и становится просто углеродомъ, растворенным въ желѣзѣ, какъ будто бы до плавленія онъ находился въ растворѣ или соединеніи, а не какъ графитъ.

166) Область II, *AaB*. Происходитъ избирательное замерзаніе. Расплавленное углеродистое желѣзо и твердый аустенитъ.—Въ этой области металлъ состоитъ изъ 1) твердаго аустенита, представляющаго собой твердый растворъ углерода въ желѣзѣ и являющагося избыточнымъ веществомъ, и изъ 2) маточнаго металла или расплавленнаго раствора углерода. Этотъ аустенитъ называется «первичнымъ», въ отличіе отъ эвтектическаго аустенита.

Теоретически, при охлажденіи въ этой области должны происходить слѣдующія реакціи:

A. При любомъ составѣ налѣво отъ ординаты, соотвѣтствующей 2,00 процентамъ углерода (линія *ea*), избирательное замерзаніе:

1) расплавленный растворъ = твердый первичный аустенитъ.

B. При содержанiи углерода между 2,00 и 4,30 процентами, при охлажденiи въ этой области до нижней границы *aB*, но не переходя ее, избирательное замерзанiе:

2) расплавленный растворъ = твердый 2,00-процентный первичный аустенитъ + расплавленная эвтектика.

(Подъ 2,00-процентнымъ аустенитомъ разумѣется аустенитъ, содержащiй 2,00% углерода въ растворѣ).

При переходѣ черезъ нижнюю границу *aB* замерзанiе эвтектики:

3) расплавленная эвтектика = твердая эвтектика = 2,00-процентный аустенитъ + цементитъ. Ихъ можно назвать «эвтектическимъ» аустенитомъ и «эвтектическимъ» цементитомъ.

Итакъ, сумму реакцiй 2) и 3), происходящихъ до нижней границы и при переходѣ черезъ нее, можно представить слѣдующимъ образомъ:

4) расплавленный растворъ = 2,00-процентный первичный и эвтектическiй аустенитъ + эвтектическiй цементитъ.

167) Область III, *CBc*, происходитъ избирательное замерзанiе; расплавленное углеродистое желѣзо и цементитъ.—Въ этой области масса металла, по всей вѣроятности, состоитъ изъ 1) твердаго цементита, являющагося избыточнымъ веществомъ, и изъ 2) еще расплавленнаго маточнаго металла, представляющаго собой растворъ углерода въ желѣзѣ. Этотъ цементитъ называется «первичнымъ» въ отличiе отъ эвтектическаго.

Теоретически въ этой области должны идти слѣдующiя реакцiи:

При охлажденiи черезъ всю эту область до нижней ея границы *Bc*, но не переходя послѣдней, избирательное замерзанiе:

5) расплавленный растворъ = расплавленная эвтектика + первичный цементитъ.

При переходѣ черезъ нижнюю границу *Bc* замерзанiе эвтектики:

3) расплавленная эвтектика = твердая эвтектика = 2,00-процентный эвтектическiй аустенитъ + эвтектическiй цементитъ.

Итакъ, сумму реакцiй 5) и 3), происходящихъ въ этой области до ея нижней границы и при переходѣ черезъ нея, можно представить слѣдующимъ образомъ:

6) расплавленный растворъ = 2,00-процентный эвтектическiй аустенитъ + первичный и эвтектическiй цементитъ.

168) Область IV, *AaSHG;* аустенитъ, твердый растворъ углерода въ желѣзѣ, являющійся результатомъ реакціи 1). Теоретически при охлажденіи въ этой области не должно происходить никакихъ превращеній.

169) Область V, *GHSP,* происходитъ избирательное превращеніе; аустенитъ и ферритъ.—Ферритъ является избыточнымъ веществомъ, аустенитъ же—еще не испытавшимъ превращенія твердымъ маточнымъ металломъ. Выше линіи Ar_3 ферритъ находится въ состояніи бэта, ниже ея въ состояніи альфа (см. § 192). Пояснимъ это нѣсколько подробнѣе. Какъ мы знаемъ, при избирательномъ замерзаніи избыточное вещество постепенно вымерзаетъ, и въ то же время остающійся расплавленный маточный металлъ соотвѣтственно приближается къ эвтектической пропорціи. Точно также и при охлажденіи въ этой области желѣзо, которое можно разсматривать какъ избыточное вещество, постепенно выдѣляется въ массѣ аустенита, находящейся при температурѣ краснаго каленія, и переходитъ въ свободное состояніе, т. е. ферритъ [1]).

Аустенитъ при этомъ становится богаче углеродомъ, постепенно приближаясь къ «гардениту» или эвтектоидной пропорціи 0,90% углерода, при чемъ достигаетъ ее, когда температура понижается до температуры эвтектоиднаго превращенія PSP′. Эту реакцію можно представить такъ:

7) аустенитъ = гарденитъ + до-эвтектоидный ферритъ или

7) аустенитъ = 0,9 процентный аустенитъ + до-эвтектоидный ферритъ.

Эвтектика распадается на свои составляющія, когда температура, понижаясь, достигаетъ точки замерзанія эвтектики; точно также и здѣсь, когда температура, понижаясь, достигаетъ температуры эвтектоиднаго превращенія, твердый маточный металлъ превращается въ ферритъ и цементитъ, которые располагаются въ видѣ чередующихся пластинокъ, образуя перлитъ. Эту реакцію можно представить слѣдующимъ образомъ:

---

[1]) Говоря, что ферритъ «выдѣляется» въ твердомъ аустенитѣ, мы не подразумѣваемъ подъ этимъ, что онъ изъ него удаляется. Маленькія частицы феррита остаются въ заключающей ихъ массѣ, потому что, хотя аустенитъ при красномъ каленіи и достаточно пластиченъ, чтобы ферритъ, выдѣлившійся при реакціи 7) могъ сливаться въ зерна, видимыя подъ микроскопомъ, однако недостаточно пластиченъ, чтобы они могли удалиться изъ маточной массы.

8) гарденитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ или

8) 0,9 процентный аустенитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ.

Итогъ этихъ превращеній 7) и 8), постепеннаго превращенія въ области V и превращенія эвтектоида при переходѣ черезъ границу послѣдней, можно представить слѣдующимъ образомъ.

9) Аустенитъ = до-эвтектоидный и эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ.

Весь аустенитъ въ пропорціи 1 : 6 съ ферритомъ располагается въ видѣ чередующихся пластинокъ и образуетъ перлитъ, остальная же часть феррита, находящаяся въ избыткѣ сверхъ этой пропорціи, является избыточнымъ веществомъ, «структурно свободнымъ ферритомъ», согласно Sauveur'у.

Этотъ ферритъ можетъ быть названъ «до-эвтектоиднымъ», съ цѣлью показать, что онъ образуется раньше, чѣмъ обогащеніе окружающаго аустенита достигаетъ эвтектоидной пропорціи а слѣдовательно и раньше, чѣмъ этотъ аустенитъ превратится въ эвтектоидъ «перлитъ».

170) Область VI, *PSh'O;* перлитъ и до-эвтектоидный ферритъ, образующіеся при реакціи 9).—Изъ нихъ ферритъ является избыточнымъ веществомъ, перлитъ же эвтектоидомъ или ложной эвтектикой. Теоретически при охлажденіи въ этой области не должно происходить никакихъ реакцій.

171) Область VII, *SaBcP'*, происходитъ избирательное превращеніе; аустенитъ и цементитъ.—Цементитъ является избыточнымъ веществомъ, аустенитъ же еще не испытавшимъ превращенія твердымъ маточнымъ металломъ. Эта область имѣетъ извѣстную близость съ областью V; область VII гипер-эвтектоидная область, V гипо-эвтектоидная.

Дѣло въ томъ, что металлъ при охлажденіи, переходя въ эту область, состоитъ изъ 1) эвтектики, образованной цементитомъ и 2-процентнымъ аустенитомъ, и изъ 2) вещества, находящагося въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи. Этимъ веществомъ въ случаѣ гипо-эвтектическаго металла является первичный аустенитъ, въ случаѣ же гипер-эвтектическаго чугуна—первичный цементитъ. Совершенно подобно тому, какъ при охлажденіи въ области V избыточное вещество, ферритъ, постепенно выдѣляется изъ раскаленнаго твердаго аустенита, вызывая въ послѣднемъ

повышеніе процентнаго содержанія углерода, до тѣхъ поръ, пока оно не достигнетъ эвтектоидной или гарденитной пропорціи, и здѣсь, при охлажденіи въ области VII, углеродъ, находящійся въ избыткѣ сверхъ эвтектоидной пропорціи, выдѣляется въ видѣ цементита изъ эвтектическаго аустенита, а въ случаѣ гипо-эвтектическаго металла—изъ первичнаго аустенита.

Вслѣдствіе того, что этотъ цементитъ возникаетъ раньше, нежели достигается эвтектоидная пропорція, онъ можетъ быть названъ «до-эвтектоиднымъ» цементитомъ.

Цементитъ содержитъ гораздо больше углерода, чѣмъ аустенитъ, а именно 6,67%, и потому выдѣленіе его вызываетъ постепенное обѣднѣніе остаточнаго аустенита углеродомъ. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока содержаніе углерода въ аустенитѣ не упадетъ до эвтектоидной пропорціи 0,90%, и пока одновременно съ этимъ температура не достигнетъ эвтектоидной точки превращенія 690° или Ar_1.

Эту реакцію можно представить слѣдующимъ образомъ:

10) аустенитъ = гарденитъ + до-эвтектоидный цементитъ или

10) аустенитъ = 0,9-процентный аустенитъ + до-эвтектоидный цементитъ.

Когда охлажденіе доходитъ до этой точки, остающійся аустенитъ, называемый уже теперь гарденитомъ, въ свою очередь превращается въ перлитъ. Эту реакцію можно представить такимъ образомъ:

8) Гарденитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ или

8) 0,90-процентный аустенитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ.

Итогъ этихъ превращеній, подобно тому, какъ это было сдѣлано въ случаѣ области V, можно выразить слѣдующимъ образомъ:

11) аустенитъ = эвтектоидный ферритъ + до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ.

Или, общей реакціей для всей этой области, включая нижнюю, но не верхнюю ея границу, будетъ:

Для гипо-эвтектическаго чугуна:

12) Эвтектическій цементитъ + первичный и эвтектическій 2-процентный аустенитъ = эвтектическій, до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ + эвтектоидный ферритъ.

Для гипер-эвтектическаго чугуна:

13) Первичный и эвтектическій цементитъ + эвтектическій 2-процентный аустенитъ = первичный, эвтектическій, до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ + эвтектоидный ферритъ.

172) Область VIII, *SP'fh'*; перлитъ и цементитъ, являющіеся результатомъ только что указанныхъ реакцій 12) 13).— Теоретически въ этой области при охлажденіи не происходитъ никакихъ реакцій.

173) Итоги.—Во-первыхъ имѣются двѣ важныя области: область аустенита надъ *GHSa* и область феррита и цементита или перлита ниже *PSP'*.

Затѣмъ имѣются двѣ переходныхъ области: верхняя, заключающая въ себѣ области избирательнаго замерзанія II и III, и нижняя, заключающая въ себѣ области избирательнаго превращенія V и VII.

Различныя реакціи, которыя приводились въ §§ 165 — 173, сгруппированы въ таблицѣ 8.

Сдѣлавъ общій обзоръ соединеній желѣза съ углеродомъ, перейдемъ теперь къ болѣе подробному разсмотрѣнію нѣкоторыхъ частностей, при чемъ главною нашею цѣлью будетъ постараться установить соотношеніе между превращеніями, происходящими при замерзаніи и охлажденіи соединеній углерода съ желѣзомъ, и превращеніями, происходящими при замерзаніи сплавовъ, которымъ были посвящены главы II, III, IV и V.

174) Кривая замерзанія *ABC*, *aBc*; ея основныя черты.— Лѣвая часть *AB*, *aB*, очевидно, одинакова по типу съ кривой замерзанія сплавовъ висмута съ оловомъ, рис. 33 и 49; она указываетъ на ограниченную растворимость и на то, что эвтектика образуется только у среднихъ членовъ серіи. Правая часть діаграммы доходитъ только до, приблизительно, 6,00% углерода. Полная діаграмма, разумѣется, должна простираться отъ 0 углерода, 100 желѣза съ лѣвой стороны, до 0 желѣза, 100 углерода съ правой стороны. Относительно продолженія этой кривой замерзанія вправо за 5,50% углерода у насъ имѣется очень мало свѣдѣній. Въ силу этого, приходится сосредоточить вниманіе, собственно говоря, только на отрѣзкѣ кривой замерзанія.

Изученная часть правой стороны діаграммы, повидимому, указываетъ на полную нерастворимость, совершенно такъ же, какъ это нами принималось для упрощенія въ случаяхъ льда и соли,

Таблица 8.

Реакціи, происходящія при замерзаніи и превращеніи соединеній желѣза съ углеродомъ.

		РЕАКЦІЯ.	Классъ, къ которому принадлежитъ реакція.	Область, къ которой относится реакція.
аустенитъ-цементитъ	замерзаніе.	1) Расплавленный растворъ = твердый первичный аустенитъ	Гипо-эвтектическая.	II.
		2) Расплавленный растворъ = 2-хъ проц. первичный аустенитъ + расплавленная эвтектика	Гипо-эвтектическая.	II.
		3) Расплавленная эвтектика = твердая эвтектика = 2-хъ-проц. эвтектическій аустенитъ + эвтектическій цементитъ	Гипо- и гипер-эвтектическая.	(II—VII) [1]), (III—VII).
		4) [= 2) + 3)] Расплавленный растворъ = 2-хъ-проц. первичный и эвтектическій аустенитъ + эвтектическій цементитъ	Гипо-эвтектическая.	II, (II—VII).
		5) Расплавленный растворъ = расплавленная эвтектика + первичный цементитъ	Гипер-эвтектическая.	III.
		6) [= 5 + (3)] Расплавленный растворъ = 2-хъ-проц. эвтектическій аустенитъ + первичный и эвтектическій цементитъ	Гипер-эвтектическая.	III, (III—VII).
Діаграмма	превращеніе	7) Аустенитъ = гарденитъ + до-эвтектоидный ферритъ	Гипо-эвтектоидная.	V.
		7) Аустенитъ = 0,9 проц. аустенитъ + до-эвтектоидный ферритъ	Гипо-эвтектоидная.	V.
		8) Гарденитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ	Гипо- и гипер-эвтектоидная.	(V—VI), (VII—VIII) Ar_1.
		8) 0,9-проц. аустенитъ = перлитъ = эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ	Гипо- и гипер-эвтектоидная.	(V—VI), (VII—VIII) Ar_1.

[1]) Подъ (II—VII), (III—VII) и т. д. подразумѣвается граница между областями II и VII, III и VII и т. д.

		РЕАКЦІЯ.	Классъ, къ которому принадлежитъ реакція.	Область, къ которой относится реакція.
Діаграмма аустенитъ-цементитъ	превращеніе.	9) Аустенитъ = до-эвтектоидный и эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ	Гипо-эвтектоидная.	V, (V—VI).
		10) Аустенитъ = гарденитъ + до-эвтектоидный цементитъ	Гипер-эвтектоидная.	VII.
		10) 9) Аустенитъ = 0,9 проц. аустенитъ + до-эвтектоидный цементитъ	Гипер-эвтектоидная.	VII.
		11) Аустенитъ = эвтектоидный ферритъ + до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ	Гипер-эвтектоидная.	VII, (VII—VIII).
		12) Гипо-эвтектическій чугунъ эвтектическій цементитъ + первичный и эвтектическій 2-хъ проц. аустенитъ = эвтектическій, до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ + эвтектоидный ферритъ.	Гипо-эвтектическая. 2% углерода или менѣе.	VII, (VII—VIII).
		13) Гипер-эвтектическій чугунъ первичный и эвтектическій цементитъ + эвтектическій 2-хъ проц. аустенитъ = первичный, эвтектическій, до-эвтектоидный и эвтектоидный цементитъ + эвтектоидный ферритъ.	Гипер-эвтектическая. 2% углерода или болѣе.	VII, (VII—VIII).
Переходъ отъ діаграммы цементита къ діаграммѣ графита		14) Fe_3C = аустенитъ + графитъ 15) Fe_3C = ферритъ + графитъ		
Діаграмма аустенитъ-графитъ.	замерзаніе.	3') Расплавленная эвтектика = твердая эвтектика = 2-хъ проц. эвтектическій аустенитъ + эвтектическій графитъ	Гипо- и гипер-эвтектическая.	(II—VII), (III—VII).
		4') [= 2) + 3')] Расплавленный растворъ = 2-хъ проц. первичный и эвтектическій аустенитъ + эвтектическій графитъ	Гипо-эвтектическая.	II, (II—VII).
		5') Расплавленный растворъ = расплавленная эвтектика + первичный графитъ	Гипер-эвтектическая.	III.

свинца и олова (§§ 21, 48). Такимъ образомъ, разсматривая кривую замерзанія *ABC*, *aBc*, въ цѣломъ, мы можемъ сказать, что она состоитъ изъ двухъ частей различнаго типа; лѣвая часть, гдѣ наблюдается ограниченная растворимость, одинакова по типу съ кривыми замерзанія сплавовъ висмута съ оловомъ, правая же часть, гдѣ наблюдается полная нерастворимость, одинакова по типу съ кривыми замерзанія водныхъ растворовъ соли и сплавовъ свинца съ оловомъ.

B, очевидно, представляетъ собой эвтектическую точку и соотвѣтствуетъ 4,30% углерода и 95,70% желѣза. *AB* является верхней кривой замерзанія, когда желѣзо находится въ избыткѣ, т. е. когда содержаніе углерода менѣе 4,30%, желѣза же болѣе 95,70%; при пониженіи температуры до любой точки на этой линіи начинаетъ выдѣляться аустенитъ (твердый растворъ углерода въ желѣзѣ). *BC* является верхней кривой замерзанія, когда въ избыткѣ находится углеродъ, т. е. когда содержаніе углерода превышаетъ 4,30%, желѣза же менѣе 95,70%; при пониженіи температуры до любой точки на этой линіи начинаетъ выдѣляться углеродъ въ видѣ цементита.

175) Области IV и VII; строеніе желѣза при 1130° при различномъ содержаніи углерода. — Положимъ, что температура понизилась до 1130°, такъ что замерзаніе окончилось и вся масса металла затвердѣла, но что касается до области IV, то превращенія, представленныя группой линій *GHSa*, *PSP'*, еще не начались, а въ области VII они только начинаются. Посмотримъ, каково при этомъ будетъ строеніе.

1. Область IV. Эвтектика отсутствуетъ. Рядъ стали. Въ этой области металлъ, находящійся при температурѣ краснаго, или даже бѣлаго, каленія, состоитъ, главнымъ образомъ, изъ аустенита, твердаго раствора углерода въ желѣзѣ; концентрація раствора, иначе говоря, содержаніе въ немъ углерода, повышается слѣва направо. При эвтектоидномъ составѣ, 0,90% углерода, его называютъ иногда гарденитомъ.

176) 2. Эвтектика, изъ которой при этой температурѣ состоитъ чугунъ, содержащій 4,30% углерода, является по характеру средней между эвтектикой сплавовъ, образованныхъ металлами съ ограниченной взаимной растворимостью (сплавы висмута съ оловомъ, металловъ *H* и *G*) и эвтектикой сплавовъ, образованныхъ металлами, совершенно взаимно нерастворимыми

(свинецъ съ оловомъ; другой примѣръ, ледъ—соль). Эвтектика, о которой теперь идетъ рѣчь, состоитъ изъ чередующихся частичекъ двухъ ея составляющихъ. *Изъ* нихъ одна, аустенитъ, собтвѣтствуетъ насыщенному твердому раствору, олову, насыщенному висмутомъ, въ эвтектикѣ сплава олова съ висмутомъ, и должна поэтому быть насыщеннымъ твердымъ растворомъ углерода въ желѣзѣ, т. е. насыщеннымъ аустенитомъ. Другая составляющая, цементитъ, соотвѣтствуетъ олову, не содержащему свинца, въ правой части рис. 24.

177) 3. Область VII. Эвтектика присутствуетъ. Рядъ чугуна. Точки, расположенныя между a, B и c на рис. 33 и 49 отвѣчаютъ конгломерату, состоящему изъ эвтектики и избыточнаго вещества, которымъ можетъ являться, въ зависимости отъ состава, висмутъ или олово, металлъ H или металлъ G. При этомъ избыточный металлъ можетъ быть насыщенъ или нѣтъ, смотря по тому, изгладилась ли первоначальная неоднородность путемъ диффузіи или нѣтъ. Точно также и гипо-эвтектическій чугунъ, содержащій приблизительно отъ 2 до 4,30 процентовъ углерода, есть конгломератъ, состоящій изъ 1) эвтектики и 2) избыточнаго вещества, первичнаго аустенита, твердаго раствора углерода въ желѣзѣ. Послѣдній можетъ быть насыщенъ или нѣтъ, смотря по тому, изгладилась ли путемъ диффузіи первоначальная неоднородность, возникшая при его отложеніи, или не изгладилась. Гипер-эвтектическій же чугунъ, содержащій свыше 4,30% углерода, есть конгломератъ, состоящій изъ той же эвтектики и избыточнаго вещества, каковымъ въ данномъ случаѣ является углеродъ, въ видѣ первичнаго цементита.

Итакъ, при этой температурѣ чугунъ, содержащій болѣе 2 процентовъ углерода, состоитъ изъ конгломерата, образованнаго аустенитомъ и цементитомъ; *ибо* въ составъ его входитъ или одна эвтектика (аустенитъ + цементитъ), или эвтектика съ избыткомъ аустенита или цементита. Такому воззрѣнію нисколько не противорѣчитъ тотъ фактъ, что часть этихъ двухъ веществъ смѣшана въ видѣ эвтектики, которая въ свою очередь смѣшана съ избыткомъ того или другого изъ этихъ веществъ.

Во избѣжаніе недоразумѣній, необходимо твердо помнить, что въ любомъ гипер-эвтектическомъ чугунѣ, напримѣръ со-

держащемъ 5% углерода и 95% желѣза, углеродъ находится въ избыткѣ, желѣза же недостаетъ, ибо углерода содержится больше, чѣмъ соотвѣтствуетъ эвтектической пропорціи, желѣза же меньше. При этомъ не слѣдуетъ обращать вниманіе на то, что процентное содержаніе желѣза въ 19 разъ больше углерода, и что атомное количество входящаго въ составъ массы желѣза приблизительно въ четыре раза больше атомнаго количества углерода (См. § 34*A*).

Уже было указано на то, что, теоретически, аустенитъ долженъ быть насыщенъ. Если мы примемъ, что 2 процента углерода представляютъ собой точно то количество, которое требуется для его насыщенія, тогда процентное содержаніе цементита должно отвѣчать избытку содержанія углерода сверхъ этихъ 2 процентовъ.

178) Возникновеніе строенія, отвѣчающаго 1130°.—Посмотримъ теперь, какъ возникаетъ строеніе, наблюдаемое въ области IV и на верхней границѣ области VII. Прослѣдимъ для этого на рис. 68 охлажденіе съ 1500° до 1130° типичныхъ видовъ желѣза, т. е. различныхъ видовъ желѣза съ типичнымъ содержаніемъ углерода. Остановимъ нашъ выборъ на 1) эвтектическомъ чугунѣ, 2) стали съ 1,00 процентомъ углерода, 3) гипо- и 4) гипер-эвтектическомъ чугунѣ. Для упрощенія, не будемъ принимать во вниманіе замедленія въ реакціяхъ и положимъ, что превращенія будутъ происходить тотчасъ, какъ только они должны будутъ наступить.

Полезно помнить, что сталь, разсмотрѣніемъ которой мы сейчасъ займемся, существенно отличается отъ чугуновъ тѣмъ, что она лишена эвтектики, между тѣмъ какъ послѣдніе ее должны содержать, по крайней мѣрѣ теоретически.

179) 1. 4,30%. Эвтектическій чугунъ съ 4,30% углерода испытываетъ только одно превращеніе, состоящее въ замерзаніи и одновременномъ расщепленіи на чередующіяся пластинки цементита и насыщеннаго аустенита при температурѣ *B* (1130°). Кривая охлажденія ничѣмъ не отличается отъ кривыхъ охлажденія другихъ эвтектикъ, рис. 10 и 28*E*. Между кривыми охлажденія, представленными на рис. 28*E* и на рис. 68, существуетъ слѣдующее соотвѣтствіе:

Рис. 28*E*.	Рис. 68.	
AC	*Q″B*	Расплавленный эвтектическій чугунъ охлаждается.
CD	*B*	Замерзаетъ при постоянной температурѣ.

180) 2. 1,00%. Сталь, содержащая 1% углерода *Q*), при охлажденіи до *q* на линіи *AB* начинаетъ замерзать избирательнымъ путемъ, совершенно такъ же, какъ сплавъ металловъ *G* и *H*, *q* на рис. 49.

Первый вымерзшій слой или зародышъ первичнаго аустенита имѣетъ составъ *p*. По мѣрѣ дальнѣйшаго пониженія температуры, температура и составъ маточнаго металла скользятъ вдоль *AB* отъ *q* къ *t′*, и онъ становится все богаче углеродомъ. Температура и составъ отлагающихся слоевъ скользятъ отъ *p* къ *t′*, по мѣрѣ того какъ идетъ ихъ обогащеніе углеродомъ, слѣдуя по линіи, расположенной гдѣ-то вблизи намѣченной здѣсь линіи *pt′*. Температура же и составъ замерзшей части (принимая, что диффузія сгладила неоднородность, пріобрѣтенную ею во время отложенія) въ то же время передвигаются вдоль *Aa* отъ *p* къ *r*, по мѣрѣ того какъ она въ свою очередь становится богаче углеродомъ. Если же диффузія неполная, тогда они передвигаются по какому-либо другому пути къ нѣкоторой точкѣ, лежащей непремѣнно на ординатѣ *QW*, ибо конечный составъ совершенно замерзшей массы долженъ быть одинаковъ съ исходнымъ составомъ расплавленнаго металла, $Q = 1$ проц.

Кривая охлажденія подобна представленной на рис. 30, и между ними существуетъ слѣдующее соотвѣтствіе:

Рис. 30.	Рис. 68.	
AB	*Qq*	Расплавленная сталь охлаждается.
BC	*qr*	Сталь замерзаетъ избирательнымъ путемъ, съ образованіемъ первичнаго ненасыщеннаго аустенита.
CE	*rr′*	Затвердѣвшая сталь охлаждается.

181) 3. 3,10%. Ходъ охлажденія гипо-эвтектическаго чугуна, содержащаго, скажемъ, 3,10% углерода, *Q′*, можно сравнить съ ходомъ охлажденія сплава, образующаго эвтектику и состоящаго изъ металловъ, взаимно до извѣстной степени растворимыхъ въ твердомъ состояніи, *n*, рис. 49. По охлажденіи

до *n* (1280°), начинается избирательное вымерзаніе первичнаго аустенита, при чемъ температура и составъ маточнаго металла, по мѣрѣ его обогащенія углеродомъ, передвигаются отъ *n* къ *B*. Температура и составъ отлагающихся слоевъ передвигаются отъ *m* къ *e*, отъ *e* къ *a* и затѣмъ перескакиваютъ къ *B*, по мѣрѣ того, какъ эти слои проходятъ послѣдовательныя стадіи 1) ненасыщеннаго первичнаго аустенита, 2) насыщеннаго первичнаго аустенита и 3) эвтектики. Температура же и составъ замерзшей части, разсматриваемой какъ цѣлое, передвигаются отъ *m* къ *a* (первичный твердый растворъ), затѣмъ отъ *a* къ *B* (конгломератъ, состоящій изъ аустенита и эвтектики). Кривую охлажденія можно сравнить съ представленной на рис. 31; между ними можно установить слѣдующее соотвѣтствіе:

Рис. 31.	Рис. 68.		
AB	*Q'n*	Расплавленный гипо-эвтектическій чугунъ охлаждается.	
BB'	*nn'*	Вымерзаетъ первичный ненасыщенный аустенитъ.	періодъ избирательнаго замерзанія.
B'C	*n'n''*	Вымерзаетъ первичный насыщенный аустенитъ.	
CD	*n''*	Эвтектика замерзаетъ при постоянной температурѣ.	

182) 4. 5,00%. Ходъ охлажденія гипер-эвтектическаго чугуна можно сравнить съ ходомъ охлажденія водныхъ растворовъ соли и сплавовъ свинца съ оловомъ, относительно составныхъ частей которыхъ мы приняли, что они совершенно взаимно не растворимы въ твердомъ состояніи. При избирательномъ замерзаніи избыточное вещество, углеродъ, вымерзаетъ свободнымъ отъ недостающаго вещества, желѣза (Въ данномъ случаѣ, когда масса находится въ расплавленномъ состояніи, нѣкоторые склонны разсматривать углеродъ, какъ растворитель). Въ періодѣ избирательнаго замерзанія, *T'T''*, такимъ образомъ, вымерзаетъ чистый цементитъ, маточный же металлъ соотвѣтственно обогащается желѣзомъ, т. е. становится бѣднѣе углеродомъ. Температура и составъ маточнаго металла скользятъ отъ *T'* къ *B*, при чемъ содержаніе углерода въ немъ падаетъ до эвтектической пропорціи 4,30%, и одновременно достигается эвтектиче-

ская точка замерзанія 1130°. Вслѣдъ за этимъ наступаетъ періодъ неизбирательнаго замерзанія или замерзанія эвтектики, во время котораго маточный металлъ образуетъ эвтектику.

По окончаніи замерзанія масса, слѣдовательно, представляетъ собой конгломератъ, состоящій изъ 1) первичнаго цементита, вымерзшаго въ интервалѣ T'—T'' и 2) эвтектики, вымерзшей при T''.

Кривую охлажденія можно сравнить съ принятой нами для льда, свинца и олова, рис. 8, 28B и 28*F*. Между ними можно установить слѣдующее соотвѣтствіе:

Рис. 28*B* и 28*F*.	Рис. 68.	
AB	TT'	Гипер-эвтектическій расплавленный чугунъ охлаждается.
BC	T' T''	Вымерзаетъ первичный цементитъ, періодъ избирательнаго замерзанія.
CD	T''	Эвтектика вымерзаетъ при постоянной температурѣ T''.

183) Площади IV—VII включительно. Кривая превращенія *GHSa*, *PSP'*. Кривая *GHSa*, *PSP'*, имѣющая видъ подчеркнутаго *V*, имѣетъ большое сходство съ кривыми замерзанія серій сплавовъ, образованныхъ взаимно нерастворимыми въ твердомъ состояніи металлами и имѣющихъ эвтектику на всемъ протяженіи серіи. Къ этому типу нами были отнесены сплавы олова съ свинцомъ, а также растворы соли въ водѣ. Но данная кривая представляетъ не точки замерзанія, т. е. переходъ изъ расплавленнаго въ твердое состояніе, а превращенія, происходящія въ твердой, но еще находящейся при красномъ каленіи и пластичной стали. Какъ мы уже видѣли, составъ *S*, около 0,90% углерода, отвѣчаетъ составу опредѣленной ложной эвтектики или эвтектоида (§ 148), перлита, состоящаго изъ чередующихся пластинокъ феррита, или желѣза, и цементита, или опредѣленнаго карбида желѣза, Fe_3C; въ перлитѣ на 6 частей феррита приходится 1 часть цементита.

184) Возникновеніе такого строенія.—Этотъ вопросъ обсуждался уже довольно подробно, въ особенности въ § 145—149, 169 и 171, но быть можетъ не лишнее будетъ изложить его еще разъ въ нѣсколько иномъ, болѣе сжатомъ видѣ. Для этого прослѣдимъ охлажденіе трехъ типичныхъ видовъ стали,

а именно съ 0,90, 0,50 и 1,00% углерода, т. е. эвтектоидной, гипо-эвтектоидной и гипер-эвтектоидной стали, при чемъ будемъ обращать въ особенности вниманіе на то, какимъ образомъ возникаетъ строеніе, которое имѣетъ охлажденная сталь. При этомъ положимъ, что во всѣхъ трехъ случаяхъ мы будемъ имѣть дѣло съ металломъ, охлажденнымъ съ температуры плавленія до 1130°; при послѣдней температурѣ, какъ мы уже видѣли (§ 168), металлъ представляетъ собой ненасыщенный аустенитъ.

185) 1. Эвтектоидная сталь, 0,90% углерода. Аустенитъ такого состава, или эвтектоидный аустенитъ, носитъ спеціальное названіе «гарденитъ». Послѣдній не испытываетъ при охлажденіи никакого превращенія до тѣхъ поръ, пока температура не понизится до *S*. При температурѣ *S* онъ превращается въ уже описанный перлитъ. Кривая охлажденія не отличается отъ кривой охлажденія любого сплава эвтектическаго состава, рис. 10 и 28*E*. Соотношеніе между этими кривыми слѣдующее:

Рис. 28*E*	Рис. 68	
AC	*hS*	Твердый, накаленный до-красна, гарденитъ охлаждается.
CD	*S*	Гарденитъ распадается, образуя эвтектоидъ, перлитъ.
DE	*Sh'*	Перлитъ охлаждается.

186) 2. Гипо-эвтектоидная сталь, 0,50% углерода. — При охлажденіи съ 1130°, h^{II}, первое превращеніе наступаетъ по достиженіи линіи *HS* въ точкѣ h^{III}. По мѣрѣ пониженія температуры съ h^{III} до h^{IV}, на линіи *PS*, въ пластичной массѣ происходитъ выдѣленіе избыточнаго металла, желѣза или до-эвтектоиднаго феррита, въ видѣ зеренъ или несовершенно образованныхъ кристалловъ. Такое выдѣленіе феррита продолжается отъ h^{III} до h^{IV}.

Очевидно, оно совершенно аналогично избирательному вымерзанію свинца изъ сплава свинца съ оловомъ, богатаго свинцомъ, или льда изъ воднаго раствора соли. Постепенное выдѣленіе избыточнаго вещества, желѣза, сопровождается соотвѣтствующимъ обогащеніемъ остающагося пластичнаго маточнаго металла углеродомъ, такъ что, по мѣрѣ паденія температуры, составъ и температура маточнаго металла выражаются въ послѣдовательные промежутки времени точками на линіи *HS* между h^{III} и *S*, или, иначе говоря, составъ и температура пластичнаго маточнаго металла скользятъ отъ h^{III} къ *S*. Слѣдовательно, къ

тому времени, когда температура упадетъ до 690° или h^{IV}, маточный металлъ достигнетъ эвтектоиднаго состава, или состава гарденита, и одновременно температуры, превращенія эвтектоида. При дальнѣйшемъ пониженіи температуры гарденитъ распадается на перемежающіяся пластинки феррита и цементита или, другими словами, превращается въ перлитъ.

Кривая охлажденія подобна кривой охлажденія сплава, состоящаго изъ двухъ взаимно нерастворимыхъ металловъ, напримѣръ, свинца и олова, рис. 28*B*, *C*, *D* и *F*, или воднаго раствора соли, рис. 8, 9 и 11.

Соотвѣтствіе наблюдается слѣдующее:

Рис. 28*B*, *C*. *D* и т. д.	Рис. 68	
AB	h^{II} h^{III}	Гипо-эвтектоидный раскаленный докрасна аустенитъ охлаждается.
BC	h^{III} h^{IV}	Избыточное вещество, ферритъ, выдѣляется, маточный же металлъ обогащается углеродомъ до тѣхъ поръ, пока онъ не сдѣлается гарденитомъ, т. е. аустенитомъ съ 0,9% углерода.
CD	h^{IV}	Гарденитъ превращается въ перлитъ.
DE	h^{IV} h^{V}	Конгломератъ, состоящій изъ перлита и феррита охлаждается.

187) 3. Гипер-эвтектоидная сталь, 1% углерода, $r'W$. Охлажденіе идетъ совершенно равномѣрно отъ r' 1130° до тѣхъ поръ, пока температура не понизится до *L* на линіи *Sa*, когда начинаетъ выдѣляться избыточное вещество, углеродъ, въ видѣ кристалловъ до-эвтектоиднаго цементита; послѣдніе удерживаются пластичнымъ металломъ, въ которомъ они возникаютъ. Цементитъ продолжаетъ образовываться по мѣрѣ паденія температуры отъ *L* до *U* на линіи *PSP'*.

Образованіе цементита, такъ же какъ и въ предыдущемъ случаѣ—феррита, аналогично вымерзанію избыточнаго металла изъ расплавленнаго сплава, состоящаго изъ взаимно нерастворимыхъ металловъ, или льда изъ воднаго раствора соли. Выдѣленіе изъ аустенита кристалловъ цементита, содержащихъ 6,67% углеро а, вызываетъ обѣднѣніе маточнаго металла избыточнымъ веществомъ, углеродомъ, и обогащеніе его недостающимъ веществомъ, желѣзомъ. Это обѣднѣніе углеродомъ продолжается по

мѣрѣ паденія температуры, такъ что температура и составъ маточнаго металла скользятъ вдоль по линіи *LS*. Ко времени пониженія температуры до эвтектоидной точки превращенія, составъ маточнаго металла достигаетъ той же точки, или, иными словами, аустенитъ, становясь бѣднѣе углеродомъ, достигаетъ состава гарденита, 0,90% углерода, 99,10% желѣза.

При дальнѣйшемъ охлажденіи гарденитъ распадается и образуетъ перлитъ при приблизительно постоянной температурѣ *S*. По завершеніи этого превращенія, дальнѣйшее охлажденіе идетъ, не сопровождаясь какими-либо превращеніями, которыя могли бы привлечь особое вниманіе.

Кривая охлажденія подобна кривой охлажденія гипо-эвтектоидной стали, т. е. подобна кривой охлажденія любого сплава, состоящаго изъ взаимно нерастворимыхъ металловъ, рис. 28*B* до 28*D* и т. д. Соотношеніе наблюдается слѣдующее:

Рис. 28*B*—28*D* и т. д.	Рис. 68	
AB	*r'L*	Пластичная раскаленная до-красна гипер-эвтектоидная сталь охлаждается.
BC	*LU*	До-эвтектоидный цементитъ, избыточное вещество, образуется въ пластичной массѣ, вызывая обѣднѣніе маточнаго металла углеродомъ, до тѣхъ поръ, пока онъ не достигнетъ состава гарденита, 0,9% углерода.
CD	*U*	Гарденитъ — маточный металлъ — расщепляется, образуя перлитъ, при приблизительно постоянной температурѣ.
DE	*UW*	Конгломератъ, состоящій изъ перлита и до-эвтектоиднаго цементита охлаждается далѣе.

Повидимому, превращенія, аналогичныя происходящимъ въ твердомъ желѣзѣ, происходятъ также и въ нѣкоторыхъ другихъ сплавахъ въ твердомъ состояніи, напримѣръ, въ сплавахъ мѣди съ оловомъ [1]), мѣди съ сурьмой, рис. 51.

188) Діаграмма аустенитъ-графитъ. До сихъ поръ мы молчаливо принимали, что при затвердѣваніи чугуна содержащійся въ немъ углеродъ всегда распредѣляется только между состоя-

[1]) Wm. Campbell «Microscopical Examination of the Alloys of Copper and Tin» Proc. Inst. Mechanical Engineers, Дек. 20, 1901.

ніями аустенита и цементита. Однако, углеродъ можетъ распредѣлиться между состояніями аустенита и графита. Линіи $a'B'c$, $B'C'$, рис. 68A, и указываютъ на такое распредѣленіе. Другими словами, существуютъ двѣ различныхъ діаграммы соединеній желѣза съ углеродомъ, одна — уже изученная нами діаграмма аустенитъ-цементитъ, другая — аустенитъ-графитъ, представленная линіями $a'B'c'$, $B'C'$. Въ зависимости отъ существующихъ условій, углеродъ можетъ слѣдовать той или другой діаграммѣ, или, какъ это обычно бываетъ, однѣ молекулы его могутъ слѣдовать одной діаграммѣ, другія — иной. На рис. 68A сплошныя линіи представляютъ діаграмму аустенитъ-графитъ, а для болѣе удобнаго сравненія тамъ же пунктирными линіями представлена и діаграмма аустенитъ-цементитъ. Такъ, при замерзаніи, гиперэвтектическій чугунъ можетъ слѣдовать діаграммѣ аустенитъ-цементитъ, результатомъ чего будетъ образованіе первичнаго цементита и эвтектики изъ аустенита и цементита, т. е. образуется типичный бѣлый чугунъ, какъ мы уже видѣли въ §§ 167—187. Онъ можетъ также слѣдовать и діаграммѣ аустенитъ-графитъ, результатомъ чего будетъ выдѣленіе первичнаго графита при охлажденіи отъ $B'C'$ до $B'c'$, и образованіе эвтектики изъ аустенита и графита по минованіи $B'c'$, т. е. образуется типичный сѣрый чугунъ. Наконецъ, однѣ группы молекулъ могутъ слѣдовать одной діаграммѣ, другія — другой, какъ это и бываетъ въ большинствѣ случаевъ. Типичнымъ примѣромъ можетъ служить «половинчатый чугунъ», одни участки котораго содержатъ такъ много графита, что кажутся почти черными, другіе же, по сосѣдству, совершенно бѣлаго цвѣта. Точно также, хотя гипо-эвтектическій чугунъ на обѣихъ діаграммахъ выдѣляетъ при охлажденіи въ области II первичный аустенитъ, однако эвтектика его можетъ образоваться въ aB и состоять изъ аустенита и цементита, или образоваться въ $a'B'$ и состоять изъ аустенита и графита, или, наконецъ, въ однихъ участкахъ можетъ быть одна эвтектика, въ другихъ — другая. Здѣсь можно видѣть, что границы между областями II, III и VII на діаграммѣ аустенитъ — графитъ не вполнѣ точно совпадаютъ съ границами на діаграммѣ аустенитъ — цементитъ. Кромѣ того, возможно, что діаграмма аустенитъ — графитъ должна еще заключать рядъ линій, соотвѣтствующихъ кривымъ превращенія $GHSa$ и PSP' на діаграммѣ аустенитъ — цементитъ. Относительно положенія этихъ

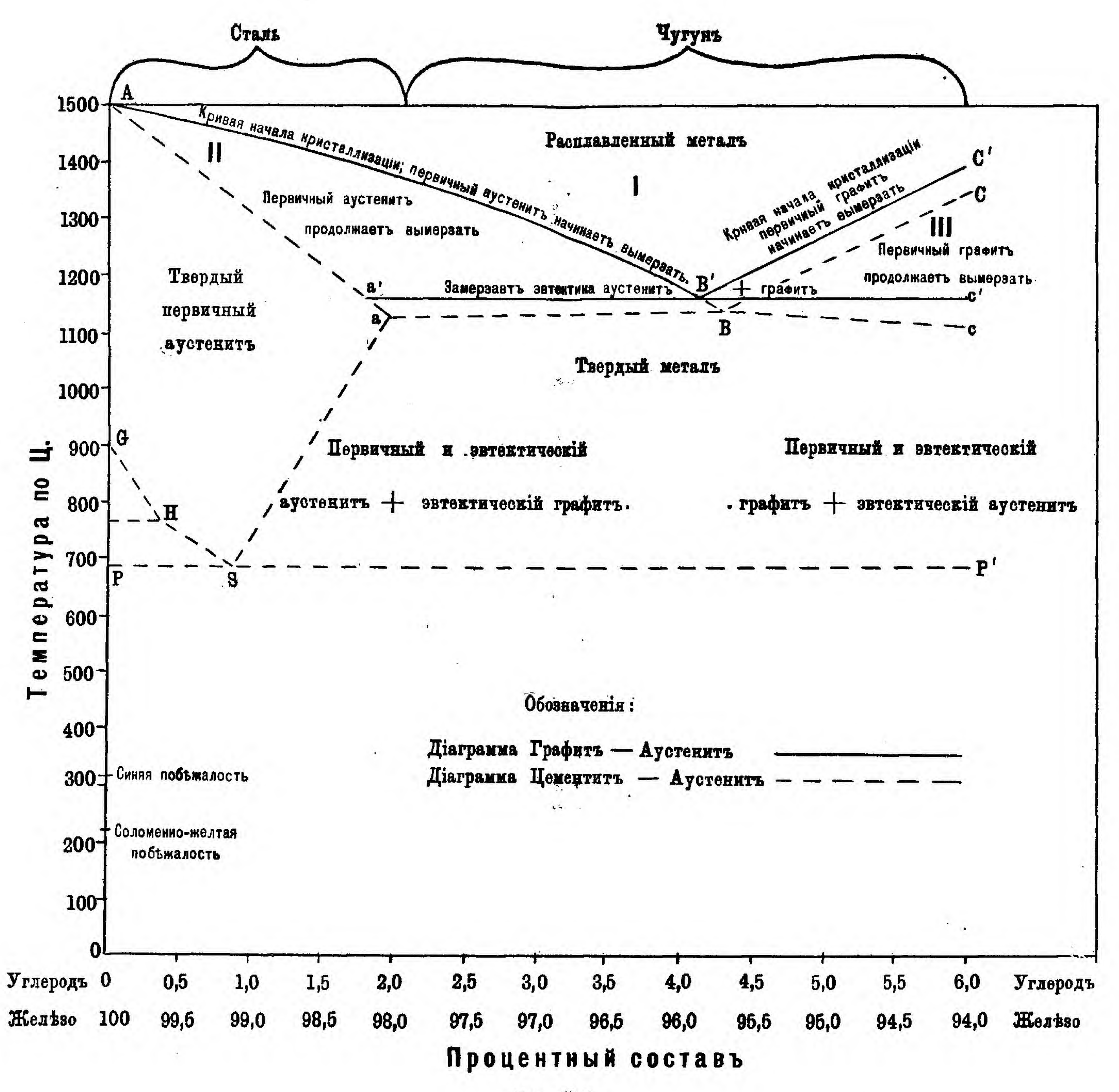

Сталь
Чугунъ
Кривая начала кристаллизаціи; первичный аустенитъ начинаетъ вымерзать.
Расплавленный металъ
I
II
III
Первичный аустенитъ продолжаетъ вымерзать
Кривая начала кристаллизаціи первичный графитъ начинаетъ вымерзать
Первичный графитъ продолжаетъ вымерзать
Замерзаютъ эвтектика аустенитъ + графитъ
Твердый первичный аустенитъ
Твердый металъ
Первичный и эвтектическій аустенитъ + эвтектическій графитъ.
Первичный и эвтектическій графитъ + эвтектическій аустенитъ
Синяя побѣжалость
Соломенно-желтая побѣжалость
Обозначенія:
Діаграмма Графитъ — Аустенитъ
Діаграмма Цементитъ — Аустенитъ
A
a'
a
B'
B
C'
C
c'
c
G
H
P
S
P'
Температура по Ц.
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Углеродъ 0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 Углеродъ
Желѣзо 100 99,5 99,0 98,5 98,0 97,5 97,0 96,5 96,0 95,5 95,0 94,5 94,0 Желѣзо
Процентный составъ

Рис. 68А.

линій такъ мало извѣстно, и стремленіе слѣдовать діаграммѣ аустенитъ—графитъ такъ слабо въ стали съ обычнымъ содержаніемъ углерода (1,25% и менѣе), что мы можемъ для нашихъ настоящихъ цѣлей не обращать вниманія на эти линіи и сосредоточиться при изученіи діаграммы аустенитъ—графитъ на эвтектической области, т. е. когда содержаніе углерода въ металлѣ составляетъ 2 или болѣе процента.

Первичный графитъ, вымерзающій при охлажденіи массы металла въ области III, и эвтектическій графитъ, образующійся при переходѣ черезъ линію $a'B'c'$, имѣютъ видъ листочковъ, которые образуютъ почти непрерывный скелетъ въ сѣромъ чугунѣ и придаютъ ему характерный цвѣтъ. Относительно области VII діаграммы аустенитъ—графитъ можно сказать слѣдующее.

При слѣдованіи діаграммѣ аустенитъ—цементитъ, въ массѣ аустенита постепенно возникаетъ цементитъ, слѣдствіемъ чего является постепенное обѣднѣніе аустенита углеродомъ, и это продолжается до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнута линія PSP', т. е. пока содержаніе углерода въ аустенитѣ не достигнетъ эвтектоидной пропорціи. Подобнаго же рода явленіе можно себѣ представить и при слѣдованіи діаграммѣ аустенитъ—графитъ. Можно представить себѣ, что по мѣрѣ пониженія температуры въ области VII, графитъ будетъ стремиться выдѣлиться въ массѣ аустенита, результатомъ чего явится обѣднѣніе послѣдняго углеродомъ. Это будетъ продолжаться до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнута аналогичная PSP' эвтектоидная температура, и пока содержаніе углерода въ аустенитѣ не будетъ соотвѣтствовать составу эвтектоида, состоящаго изъ феррита и графита. Этотъ эвтектоидъ долженъ представлять собою по отношенію къ системѣ ферритъ + графитъ то же, что гарденитъ по отношенію къ системѣ ферритъ + цементитъ. Далѣе, мы себѣ можемъ представить, что при пониженіи температуры до эвтектоидной точки, аустенитъ распадается на аналогичный перлиту эвтектоидъ, состоящій изъ феррита + графита. Все это мы можемъ себѣ представить. Но на самомъ дѣлѣ мы еще не имѣемъ возможности наблюдать этихъ послѣдовательныхъ явленій, что и неудивительно, если принять во вниманіе инертность графита.

189) Графитъ устойчивый, цементитъ неустойчивый продуктъ. Хотя между діаграммами аустенитъ—цементитъ и аустенитъ—графитъ и существуетъ въ общемъ большой параллелизмъ,

однако между ними есть и очень существенная разница, заключающаяся въ томъ, что графитъ представляетъ собою устойчивое состояніе углерода, цементитъ же неустойчивое. Этому положенію совершенно не противорѣчитъ тотъ фактъ, что, при очень многихъ условіяхъ, углеродъ легче принимаетъ состояніе цементита, чѣмъ состояніе графита. У цементита всегда существуетъ стремленіе перейти въ болѣе устойчивое состояніе графита, и при благопріятныхъ условіяхъ этотъ переходъ и происходитъ. Когда температура выше той, которая на діаграммѣ аустенитъ—графитъ отвѣчаетъ PSP', цементитъ переходитъ въ аустенитъ и графитъ, 14) Fe_3C = аустенитъ + графитъ; когда она ниже, цементитъ переходитъ въ ферритъ и графитъ, 15) Fe_3C = ферритъ + графитъ. Но графитъ никогда обратно не переходитъ непосредственно въ цементитъ, такъ что реакціи 14) и 15) необратимы. Однако, графитъ можетъ вновь раствориться въ аустенитѣ, и этотъ аустенитъ можетъ при охлажденіи дать начало цементиту. Такимъ образомъ, графитъ косвеннымъ путемъ можетъ перейти въ цементитъ.

Переходу неустойчиваго цементита въ устойчивый графитъ, конечно, благопріятствуетъ высокая температура, обусловливающая большую свободу молекулярнаго движенія. Этимъ и пользуются при старинномъ процессѣ изготовленія «ковкаго чугуна», процессѣ, изобрѣтенномъ Reaumur'омъ (См. § 229). Но, даже и при благопріятныхъ условіяхъ, реакція 14) идетъ чрезвычайно медленно и требуетъ многихъ дней для того, чтобы приблизиться къ концу.

190) Условія, опредѣляющія слѣдованіе діаграммѣ аустенитъ-цементитъ или діаграммѣ аустенитъ-графитъ.—Извѣстно, что кремній способствуетъ образованію графита. Можно принять, что весь углеродъ въ расплавленномъ чугунѣ находится въ соединеніи съ желѣзомъ или растворенъ въ немъ, такъ какъ въ противномъ случаѣ онъ долженъ былъ бы всплыть на поверхность. Извѣстная часть этого углерода при охлажденіи чугуна образуетъ графитъ, при чемъ она тѣмъ значительнѣе, чѣмъ 1) медленнѣе идетъ охлажденіе и чѣмъ 2) больше содержаніе кремнія въ металлѣ; по крайней мѣрѣ это справедливо до тѣхъ поръ, пока содержаніе кремнія не дойдетъ до 0,75% [1]).

---

[1]) Авторъ, «Trans. Am. Inst. Mining Engineers», XXX, стр. 781, 1900.

Съ другой стороны, тѣмъ меньшая часть углерода переходитъ въ графитъ, чѣмъ больше содержаніе сѣры и, при извѣстныхъ условіяхъ, марганца. Выражаясь технически, чугунъ, почти не содержащій кремнія, или богатый сѣрой или марганцемъ обладаетъ способностью быть «бѣлымъ», т. е. въ изломѣ онъ не обнаруживаетъ графита; чугунъ же, содержащій даже умѣренное количество кремнія, въ особенности при почти полномъ отсутствіи сѣры и марганца, обыкновенно бываетъ сѣрымъ, т. е. изломъ идетъ по пластинкамъ графита, образовавшимся въ немъ во время затвердѣванія. Вообще, при прочихъ равныхъ условіяхъ, чѣмъ медленнѣе ведется охлажденіе чугуна, тѣмъ онъ сѣрѣе, т. е. тѣмъ больше замѣтенъ графитъ въ изломѣ, потому что медленное охлажденіе способствуетъ образованію графита во время замерзанія и кристаллизаціи его въ большихъ пластинкахъ. Послѣднія обусловливаютъ направленіе трещины, а потому и болѣе замѣтны на изломѣ.

Комбинируя различнымъ образомъ указанныя вліянія кремнія, сѣры и скорости охлажденія, въ заводской практикѣ пользуются ими для того, чтобы придавать отливкамъ изъ чугуна желаемое содержаніе графита и такимъ путемъ вызывать въ нихъ требуемое строеніе, т. е. требуемое количественное отношеніе между ферритомъ и цементитомъ, а слѣдовательно и желаемыя свойства. Такъ, если процентное содержаніе сѣры больше обычнаго, приходится увеличивать содержаніе кремнія. Или, положимъ, что охлажденіе отливокъ должно будетъ пойти очень быстро 1) вслѣдствіе ли того, что онѣ будутъ тонки, 2) или вслѣдствіе того, что отливка ихъ будетъ производиться въ формы изъ сырого песка, или даже въ желѣзныя изложницы, вмѣсто формъ изъ сухого песка. Въ такомъ случаѣ слѣдуетъ увеличить содержаніе въ желѣзѣ кремнія, способствующаго образованію графита, ибо быстрое охлажденіе будетъ способствовать образованію цементита.

191) Роль кремнія еще не вполнѣ установлена, хотя результаты, добытые Tiemann [1]), а также Roystou [2]) и Charpy [3]) указываютъ на то, что онъ способствуетъ образованію графита.

---

[1]) «Metallographist», IV, стр. 313, 319 до 321.

[2]) «Journ. Iron and Steel Inst.», 1897, I, стр. 166.

[3]) «Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale», 1902, стр. 401.

Наблюденія надъ чугуномъ по выпускѣ его изъ доменной печи, какъ мы сейчасъ увидимъ, говорятъ за то, что кремній, повидимому, не только благопріятствуетъ слѣдованію діаграммѣ аустенитъ-графитъ, но и смѣщаетъ эвтектическій составъ влѣво, сѣра же вправо.

Образованіе графита въ гипо-эвтектическомъ чугунѣ должно наступать только по охлажденіи металла до точки замерзанія эвтектики, т. е. послѣ того какъ затвердѣетъ первичный аустенитъ, выдѣляющійся въ періодѣ избирательнаго замерзанія; однимъ словомъ, когда металлъ настолько замерзнетъ, что графитъ уже не будетъ въ состояніи всплывать на поверхность подъ вліяніемъ своего малаго удѣльнаго вѣса и будетъ механически удерживаться ранѣе его выдѣлившимся аустенитомъ. Иначе обстоитъ дѣло въ случаѣ эвтектическаго или гипер-эвтектическаго чугуна. Здѣсь графитъ выдѣляется въ самомъ началѣ періода замерзанія, когда количество вымерзшаго металла еще не достаточно для того, чтобы механически его удерживать; вслѣдствіе же сравнительно незначительнаго удѣльнаго вѣса, стремленіе графита выдѣлиться изъ металла чрезвычайно велико.

Какъ уже было указано въ § 37, у большинства сплавовъ составляющія слишкомъ мало отличаются между собой по удѣльному вѣсу, чтобы можно было наблюдать замѣтное разслоеніе. Чугунъ въ этомъ отношеніи рѣзко отличается отъ нихъ.

Температура гипер-эвтектическаго чугуна по выпускѣ изъ доменной печи очень близка въ верхней точки замерзанія, и часто даже, повидимому, отвѣчаетъ областямъ II или III, въ виду чего должно происходить избирательное замерзаніе. За это говоритъ и то, что часто на чугунѣ образуется толстая кора. При этихъ условіяхъ, на поверхность расплавленнаго чугуна поднимается значительное количество графита, который разлетается въ видѣ пыли по всему зданію. Это наблюдается даже въ тѣхъ случаяхъ, когда процентное содержаніе углерода значительно меньше, отвѣчающаго приводимой здѣсь эвтектической пропорціи, 4,30%. Выдѣленіе графита, даже самое присутствіе графита, указываютъ на то, что избирательное замерзаніе состоитъ въ образованіи графита. Послѣднее же обстоятельство доказываетъ только, что въ данномъ случаѣ металлъ является гипер-эвтектическимъ, несмотря на то, что онъ содержитъ менѣе 4,30% углерода. Отсюда можно сдѣлать выводъ, что эвтекти-

ческое содержаніе углерода равняется не 4,30 процентамъ, а значительно меньшему количеству, или, короче говоря, что кремній, который всегда содержится въ такомъ чугунѣ, смѣщаетъ положеніе эвтектики влѣво.

192) Различныя аллотропическія состоянія.—Дальнѣйшее осложненіе вноситъ то обстоятельство, что желѣзо аустенита въ области IV находится въ иномъ аллотропическомъ состояніи, чѣмъ желѣзо, которое выдѣляется въ видѣ феррита, когда при охлажденіи металлъ переходитъ изъ области IV въ области V и VI. Въ области IV желѣзо аустенита находится въ аллотропическомъ состояніи, извѣстномъ подъ названіемъ гамма (γ)-желѣзо. Желѣзо же, выдѣляющееся въ видѣ феррита при превращеніи, происходящемъ при переходѣ изъ области IV въ ту часть области V, которая расположена надъ линіей *MH*, находится въ состояніи бэта (β). Далѣе, при пониженіи температуры ниже линіи *MH*, бэта-желѣзо переходитъ въ альфа (α)-желѣзо.

193) Спеціальная номенклатура кривыхъ превращенія, *GHSa*, *PSP'*. — Съ цѣлью точнаго обозначенія природы измѣненій, соотвѣтствующихъ каждой изъ кривыхъ превращенія стали, а также съ цѣлью ясно обозначить различіе между превращеніями, происходящими при охлажденіи и при нагрѣваніи, Osmond ввелъ рядъ спеціальныхъ, въ настоящее время общепринятыхъ, названій, основанныхъ на номенклатурѣ, данной Черновымъ.

Температура, при которой гамма-желѣзо переходитъ въ бэта-желѣзо (т. е. температура, при которой свободное желѣзо, или ферритъ, начинаетъ выдѣляться изъ аустенита, напр. K' въ случаѣ стали съ 0,20% углерода) извѣстна подъ названіемъ Ar_3; температура, при которой бэта-желѣзо переходитъ въ альфа-желѣзо, извѣстна подъ названіемъ Ar_2; наконецъ, температура K''', при которой маточный аустенитъ, не разлагавшійся въ интервалѣ отъ K' до K''', переходитъ въ перлитъ, извѣстна подъ названіемъ Ar_1.

Между *H* и *S*, Ar_3 и Ar_2 совпадаютъ, точно такъ же, какъ Ar_2 и Ar_1 между *S* и P' и Ar_3, Ar_2 и Ar_1 въ *S*. Эти критическія точки въ данныхъ спеціальныхъ случаяхъ обозначаются соотвѣтственно Ar_{3-2}, Ar_{2-1} и Ar_{3-2-1}. Соотвѣтствующія критическія точки, наблюдаемыя при подъемѣ температуры, когда превращенія совершаются въ обратномъ порядкѣ, обозначаются Ac_1, Ac_2, Ac_3 и т. д. Здѣсь *A* (Черновъ) служитъ ихъ видовымъ

названіемъ, r обозначаетъ понижающуюся температуру (refroidissant), c повышающуюся температуру (chauffant). Когда говорится просто объ A_1, не указывая на то, имѣется ли въ виду Ar_1 или Ac_1, тогда слѣдуетъ понимать, что превращеніе разсматривается съ общей точки зрѣнія, при чемъ одновременно принимается во вниманіе, какъ Ac_1—превращеніе при нагрѣваніи, такъ и Ar_1—превращеніе при охлажденіи.

Относительно смѣщенія температуры этихъ кривыхъ превращенія см. послѣднюю часть § 164.

194) Свойства, соотвѣтствующія различнымъ аллотропическимъ состояніямъ. Не будетъ излишнимъ сказать нѣсколько словъ относительно свойствъ, которыми обладаетъ желѣзо въ этихъ трехъ аллотропическихъ состояніяхъ.

Альфа-желѣзо—это желѣзо въ томъ состояніи, въ которомъ оно намъ знакомо въ самыхъ мягкихъ и тягучихъ видахъ стали и сварочнаго желѣза. α-желѣзо тягуче, обладаетъ сравнительно большимъ сопротивленіемъ разрыву сильными магнитными свойствами. Оно представляетъ собой видоизмѣненіе, стойкое при всѣхъ температурахъ ниже Ar_2, и характерно для сварочнаго желѣза и медленно охлажденной низкоуглеродистой стали. Другими словами, молекулы желѣза, изъ которыхъ состоитъ ферритъ сварочнаго желѣза и низкоуглеродистой стали, повидимому, находятся въ состояніи альфа; за это говоритъ также мягкость и тягучесть этихъ разновидностей желѣза. Несомнѣнно, мягкость послѣднихъ обусловливается главнымъ образомъ тѣмъ, что въ составъ ихъ входитъ въ огромной пропорціи мягкій ферритъ, твердый же, какъ стекло, цементитъ составляетъ только незначительную часть. Но, повидимому, мягкость и тягучесть усиливаются еще тѣмъ, что ферритъ находится въ состояніи альфа, а не бэта или гамма. За правильность этого взгляда говорятъ важные факты.

Бэта-желѣзо не обладаетъ магнитными свойствами (т. е. магнитныя его свойства выражены очень слабо), стойко между Ar_2 и Ar_3, вѣроятно, очень твердо и хрупко; характерно, повидимому, для нѣкоторыхъ самозакаливающихся сталей, какъ марганцовая сталь, содержащая 7% марганца, а также для нормальной или углеродистой стали, закаленной путемъ быстраго охлажденія съ температуры краснаго каленія.

Гамма-желѣзо не обладаетъ магнитными свойствами и стойко выше Ar_3. Оно, повидимому, характерно для никкелевой стали

и для стали съ большимъ содержаніемъ марганца (скажемъ 12—14 процентовъ марганца); вѣроятно, сравнительно твердо, но тягуче.

Увеличеніе сопротивленія разрыву и твердости и уменьшеніе тягучести съ повышеніемъ содержанія углерода, надо въ сильной степени отнести на счетъ механическаго вліянія цементита, Fe_3C, образующагося изъ этого углерода въ отношеніи 15 частей цементита на 1 часть углерода. Но, до извѣстной степени, здѣсь можетъ сказываться и тормозящее вліяніе углерода, принуждающаго часть свободнаго желѣза или феррита оставаться въ одномъ изъ его болѣе твердыхъ и прочныхъ состояній, бэта или гамма, во время охлажденія съ высокой температуры, при которой производилась отливка или ковка.

195) Сходство между явленіями превращенія и замерзанія.—Подводя итоги вышесказанному, можно сказать, что явленія превращенія въ стали ея критической области аналогичны съ явленіями замерзанія сплава свинца съ оловомъ или раствора соли въ водѣ. Такъ, медленно охлажденная сталь состоитъ изъ перлита и изъ избытка цементита или феррита въ зависимости отъ того, больше ли углерода чѣмъ 0,9 процентовъ она содержитъ или меньше. Имѣющія форму *V* кривыя превращенія и горизонтальная линія превращенія PSP', которая подчеркиваетъ ихъ; выдѣленіе избыточнаго вещества, начинающееся на *V*-образныхъ кривыхъ; соотвѣтствующее постепенное обѣднѣніе маточнаго металла, продолжающееся до тѣхъ поръ, пока на линіи превращенія PSP' не достигается составъ гарденита; послѣдующее превращеніе гарденита въ перлитъ; тотъ фактъ, что составъ перлита не зависитъ отъ первоначальнаго содержанія углерода, и что составъ перлита не отвѣчаетъ простому атомному отношенію; переохлажденіе, обусловливающее рекалесценцію, — все это совершенно аналогично съ явленіями, наблюдаемыми при замерзаніи сплавовъ, образующихъ эвтектику. Перлитъ, эвтектоидъ, отличается отъ истинной эвтектики только тѣмъ, что возникаетъ путемъ превращенія въ пластичномъ твердомъ тѣлѣ, а не при замерзаніи жидкаго тѣла. Гарденитъ — это не подвергшійся превращенію, перлитъ — подвергшійся превращенію и расщепившійся эвтектоидъ.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

Тепловая обработка стали и чугуна.

196) Тепловая обработка стали и чугуна.—Свойства стали и чугуна могутъ быть глубоко измѣнены при помощи тепловой обработки. Послѣдняя основывается на двухъ главныхъ принципахъ, на контролѣ реакцій, подверженныхъ замедленію, въ особенности 9), 11) и 14), и на контролѣ структуры.

Подъ контролемъ реакцій, подверженныхъ замедленію, подразумѣвается, что ихъ заставляютъ идти до заранѣе опредѣленной степени съ тою цѣлью, чтобы имѣть возможность контролировать приблизительный составъ сплава, напримѣръ, съ тою цѣлью, чтобы онъ точно содержалъ желаемое количество аустенита съ одной стороны, феррита и цементита съ другой стороны. Мы имѣемъ возможность контролировать эти реакціи, или задерживая ихъ при помощи быстраго охлажденія, когда онѣ имѣютъ стремленіе происходитъ съ весьма большой скоростью при охлажденіи металла съ высокой температуры, при которой онъ былъ изготовленъ, отлитъ, откованъ или прокатанъ; или, наоборотъ, заставляя ихъ идти дальше, чѣмъ онѣ пошли бы сами при нормальныхъ условіяхъ охлажденія. Главныя изъ реакцій, которыми мы можемъ распоряжаться по собственному усмотрѣнію, повидимому, слѣдующія:

9) Аустенитъ = до-эвтектоидный и эвтектоидный ферритъ + эвтектоидный цементитъ, въ гипо-эвтектоидной стали (См. § 169).

11) 2-процентный аустенитъ = эвтектоидный ферритъ + доэвтектоидный и эвтектоидный цементитъ, въ гипер-эвтектической стали и чугунѣ (См. § 171).

14) Fe_3C = аустенитъ + графитъ (См. § 186).

Хотя всѣ эти три реакціи подвержены большому замедленію, т. е. протекаютъ въ продолженіе значительнаго промежутка времени, однако реакціи 9) и 11) все же идутъ несравненно быстрѣе, чѣмъ реакція 14); реакціи 9) и 11) проходятъ до очень значительной степени въ нѣсколько секундъ и почти доходятъ до конца въ нѣсколько минутъ, реакція же 14), которой пользуются при изготовленіи ковкаго чугуна, требуетъ нѣсколькихъ дней (См. § 229).

Путемъ контроля структуры мы придаемъ отдѣльнымъ зернамъ или кристалламъ различныхъ микроскопическихъ составляющихъ желаемую величину и расположеніе. Большинство методовъ тепловой обработки основаны на одновременномъ контролѣ какъ состава, такъ и структуры.

Правда, принципы, на которыхъ основывается тепловая обработка, можно точно формулировать. Но изъ этого еще не слѣдуетъ, что мы всегда въ состояніи точно знать то количественное соотношеніе составляющихъ между собой и ту структуру, которыя должны возникнуть подъ вліяніемъ даннаго процесса. Даже наши свѣдѣнія относительно вліянія тепловой обработки на полезныя свойства, какъ, напримѣръ, сопротивленіе на разрывъ, чрезвычайно отрывочны. Нашихъ знаній далеко недостаточно для объясненія процессовъ тепловой обработки. Приводимыя ниже объясненія даются потому, что они логичны и, по крайней мѣрѣ, не противорѣчатъ фактамъ. Если они и высказываются часто въ видѣ положительныхъ утвержденій, то только для того, чтобы не повторять нескончаемое число разъ предупрежденія, что высказываемыя теоріи нуждаются еще въ провѣркѣ.

Далѣе мы займемся разсмотрѣніемъ нѣкоторыхъ процессовъ, какъ закалка стали, закалка чугуна и т. д., которые главнымъ образомъ состоятъ въ контролѣ реакцій, подверженныхъ замедленію. Прежде же всего обратимъ вниманіе на то, какъ вліяетъ замедленіе на видъ кривыхъ охлажденія.

Процессы, основанные главнымъ образомъ на контролѣ строенія.

197) Деформація кривыхъ охлажденій вслѣдствіе замедленія реакцій.—Какъ мы уже видѣли въ § 30, переходъ изъ жидкаго состоянія въ твердое или газообразное, сопровождающійся огромнымъ измѣненіемъ энергіи, можетъ быть задержанъ тѣмъ или другимъ путемъ и можетъ не произойти при нормальной температурѣ. Такъ, жидкость можетъ оставаться жидкостью на много градусовъ внѣ температурныхъ предѣловъ, ограничивающихъ жидкое состояніе; съ одной стороны, она можетъ не переходить въ паръ при температурѣ гораздо болѣе высокой, чѣмъ ея точка кипѣнія, съ другой стороны, не замерзать при температурѣ гораздо болѣе низкой, чѣмъ ея точка замерзанія. Неудивительно, поэтому, что относительно слабыя превращенія въ желѣзѣ и другихъ металлахъ задерживаются вслѣдствіе явленій, подобныхъ переохлажденію, и не происходятъ тотчасъ по достиженіи соотвѣтствующей имъ нормальной температуры.

Дѣйствительно, эти превращенія могутъ не наступать до тѣхъ поръ, пока температура не опустится много ниже нормальной температуры превращенія, а затѣмъ могутъ происходить очень медленно. Благодаря этой медленности они могутъ быть даже остановлены путемъ очень быстраго охлажденія металла до такой низкой температуры, что та слабая сила, которая стремится произвести превращеніе, не будетъ въ состояніи преодолѣть, если можно такъ выразиться, молекулярную неподвижность, обусловливаемую низкой температурой.

Эти превращенія обыкновенно бываютъ настолько растянуты, что вызываютъ очень большую деформацію кривыхъ охлажденія. Гораздо рѣзче обозначаются превращенія, если наносить опытныя данныя иначе, а именно, если наносить на оси абсциссъ не время, считая его отъ момента начала записи, но интервалы времени, въ теченіе которыхъ температура опускается на одинъ градусъ, или на долю градуса. По этому методу нанесена кривая рис. 12, а также кривая охлажденія гипер-эвтектоидной стали, рис. 69. Обозначенія на послѣдней тѣ же, что и на кривой охлажденія на рис. 31.

Отъ *A* до *B* аустенитъ охлаждается совершенно равномѣрно. Въ *B* начинаетъ образовываться цементитъ, избыточное веще-

ство, т. е. цементитъ начинаетъ выкристаллизовываться въ пластичной массѣ, вызывая такимъ образомъ обѣднѣніе маточнаго металла углеродомъ. Это продолжается отъ *B* до *C*. Въ *C* ма-

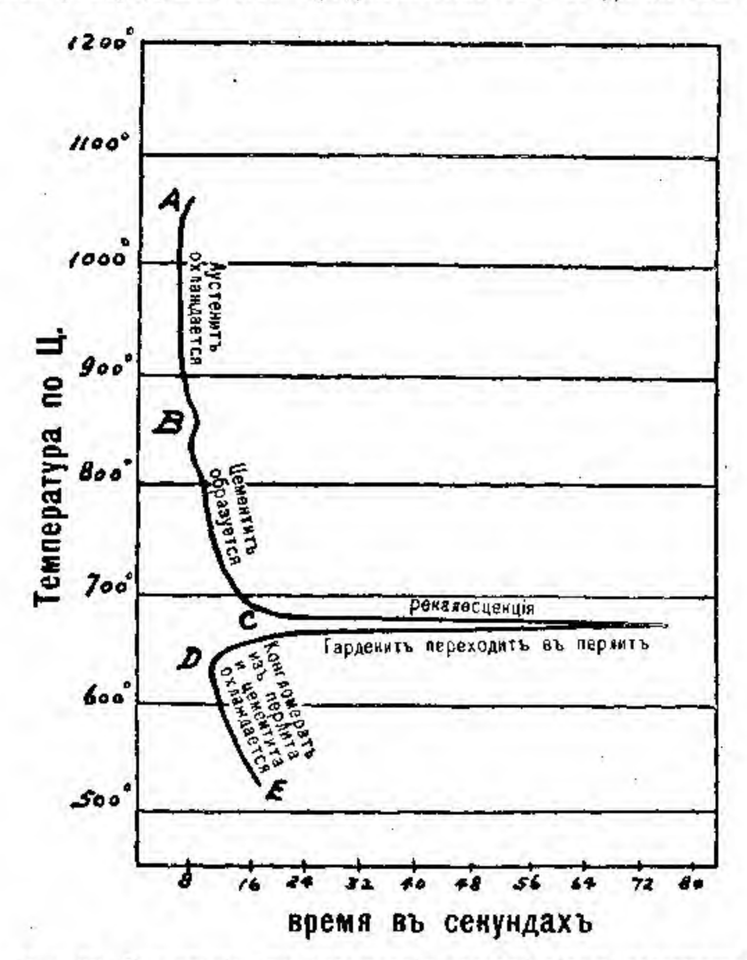


Рис. 69. Замедленія при охлажденіи твердой стали, содержащей 1,25% углерода.

(F. Osmond, «Transformations du Fer et du Carbone dans les Fers, les Aciers et les Fontes Blanches», Paris, 1888, таблица 2).

точный металлъ, ставшій уже гарденитомъ, превращается въ эвтектоидъ, перлитъ.

198) Рекалесценція.—Въ частности, превращеніе аустенита эвтектоиднаго состава въ перлитъ (реакція 8), при Ar_1, PSP' (рис. 68) обыкновенно не начинается до тѣхъ поръ, пока температура не понизится значительно ниже нормальной температуры превращенія, обратное же превращеніе при нагрѣваніи

стали не происходитъ до тѣхъ поръ, пока температуре не повысится значительно выше этой точки.

Но разъ начавшись, реакція 8) идетъ настолько быстро и съ такимъ выдѣленіемъ тепла, что температура сразу повышается, какъ въ случаѣ переохлажденія, указаннаго на рис. 14 и 15, при чемъ металлъ замѣтно на глазъ раскаляется и вновь увеличивается въ объемѣ. Это явленіе извѣстно подъ именемъ рекалесценціи. Вѣроятно, однако, что повышеніе температуры не достигаетъ истинной температуры превращенія; по крайней мѣрѣ, оно не превышаетъ послѣдней, такъ что превращеніе гарденита въ перлитъ не останавливается. Острый выступъ при *CD*, рис. 69, представляетъ рекалесценцію.

На этомъ рисункѣ ординаты выражаютъ температуру, абсциссы же не время отъ начала наблюденія, но интервалы времени, въ теченіе котораго происходитъ охлажденіе на данное число градусовъ Цельсія. Точка *B* представляетъ собой верхнюю границу области VII, т. е. Ar_3. Участокъ *DE* отсутствуетъ въ оригиналѣ; здѣсь же онъ нанесенъ приблизительно.

Это явленіе отнюдь не стоитъ особнякомъ. Въ 1847 г. Person сообщилъ о подобной же рекалесценціи у сплава d'Arcet, который затвердѣваетъ при 96°, равномѣрно охлаждается до 57°, и затѣмъ внезапно разогрѣвается на одинъ или два градуса [1]). Такой подъемъ температуры вслѣдствіе быстраго развитія тепла, вызываемаго быстрымъ ходомъ превращенія, разъ только оно началось, напоминаетъ толчки при кипѣніи жидкостей. Жидкость медленно нагрѣвается выше точки кипѣнія, затѣмъ начинается кипѣніе, и такъ какъ ея температура выше истинной точки кипѣнія, то кипѣніе и идетъ очень бурно, толчками.

199) Закалка и отпускъ стали. — Вышеизложенное даетъ намъ возможность разобраться въ основныхъ методахъ тепловой обработки стали, какъ закалка, отпускъ, т. е. смягченіе закалки, и отжигъ.

Какъ уже указывалось, сталь, находящаяся выше критическаго интервала A_1 до A_3, будучи быстро охлаждена, становится тверже, менѣе тягуча или даже крайне хрупка, и про нее говорятъ, что она «закалена». Степень закалки при этомъ повы-

---

[1]) «Comptes Rendus» XXV, стр. 444, 1847.

шается съ увеличенiемъ содержанiя углерода, такъ что, въ то время какъ свойства низкоуглеродистой стали измѣняются очень мало, сталь съ 1,00% углерода становится твердой и почти такой же хрупкой, какъ стекло.

Вызываемая такимъ путемъ твердость и хрупкость неограниченно повышаются съ увеличенiемъ скорости охлажденiя, но, повидимому, почти не зависятъ отъ температуры, при которой начинается быстрое охлажденiе, если послѣднее начинается въ области IV, рис. 68, т. е., если температура закалки выше интервала превращенiя, области V и VII, рис. 68. Въ ряду образцовъ стали, закаленныхъ при различной температурѣ въ интервалѣ превращенiя, твердость и хрупкость тѣмъ больше, чѣмъ выше температура. Однимъ словомъ, способность закаливаться у стали увеличивается съ повышенiемъ температуры въ интервалѣ превращенiя и постепенно теряется при медленномъ охлажденiи въ этомъ интервалѣ.

Сопротивленiе разрыву сперва повышается съ увеличенiемъ интенсивности закалки, достигаетъ максимума и затѣмъ понижается. Въ случаѣ высокоуглеродистой стали наивысшее сопротивленiе разрыву получается при умѣренной скорости охлажденiя; сопротивленiе же разрыву низкоуглеродистой стали, повидимому, неограниченно повышается съ увеличенiемъ скорости охлажденiя.

Закаленная сталь «отпускается», т. е. закалка ея смягчается при слабомъ нагрѣванiи, скажемъ, до 200° или 300°. При нагрѣванiи же до 600° сталь «отжигается», т. е. закалка ея совершенно пропадаетъ. Послѣ такого нагрѣванiя до 200° или 300° несущественно, охлаждать ли сталь быстро или медленно; въ обоихъ случаяхъ степень отпуска остается одинаковой. То же самое, въ сущности, можно сказать и относительно нагрѣванiя до 600°, или «отжига».

Причина, почему быстрое охлажденiе съ температуры выше критическаго интервала вызываетъ у стали такую твердость и хрупкость, кроется въ томъ, какъ нынѣ общепринято, что быстрое охлажденiе не оставляетъ достаточно времени для завершенiя превращенiя аустенита въ ферритъ и цементитъ; вслѣдствiе этого, быстро охлажденная сталь состоитъ изъ аустенита, который гораздо тверже и болѣе хрупокъ, чѣмъ смѣсь феррита и цементита, въ которую сталь имѣетъ стремленiе перейти при всѣхъ температурахъ ниже критическаго интервала.

Повидимому, стремленіе къ превращенію увеличивается по мѣрѣ удаленія температуры отъ нормальной температуры превращенія. Но по мѣрѣ того, какъ температура понижается, возникаетъ сопротивленіе, направленное противъ этого превращенія, сопротивленіе, увеличивающееся съ большей скоростью, чѣмъ стремленіе къ превращенію. Къ тому времени, какъ металлъ достигаетъ комнатной температуры, стремленіе къ превращенію, которое все еще имѣется на лицо, оказывается совершенно парализованнымъ сопротивленіемъ, направленнымъ противъ него и которое можно уподобить тренію.

Въ закаленной стали молекулы аустенита удерживаются въ ненормальныхъ условіяхъ, благодаря такому тренію, вызываемому низкой температурой. Это будетъ подробнѣе пояснено въ § 202.

Перлитъ, въ который переходитъ аустенитъ при медленномъ охлажденіи, одинъ или съ избыткомъ феррита или цементита, гораздо мягче и болѣе тягучъ, чѣмъ аустенитъ, несмотря на то, что цементитъ самъ по себѣ тверже аустенита. Но цементитъ сопровождается такимъ большимъ количествомъ феррита, что его вліяніе въ значительной степени парализуется. Такъ, медленно охлажденная сталь съ 1,00% углерода, содержала бы только 15% цементита въ смѣси съ 85% феррита. Кромѣ того, конечно, вліяетъ еще и то, что 85% феррита и 13% изъ 15% цементита расположены въ видѣ чередующихся пластинокъ и образуютъ перлитъ; такъ что сталь состоитъ изъ $85 + 13 = 98$ % перлита и 2% свободнаго цементита, т. е. цементита, находящагося въ избыткѣ сверхъ эвтектической пропорціи и поэтому структурно свободнаго отъ перлита[1]).

---

[1]) Слѣдующее сравненіе можетъ помочь уяснить себѣ кажущуюся аномалію, что закаленная сталь гораздо тверже, несравненно тверже, чѣмъ та же сталь, но отожженая, несмотря на то, что цементитъ, заключающійся въ послѣдней, тверже, чѣмъ аустенитъ, изъ которой первая состоитъ.

Для этого рассмотримъ случай стали эвтектоиднаго состава, которая, будучи отожжена, состоитъ изъ 6 частей феррита на каждую вѣсовую часть цементита. Сравнимъ съ сталью, находящеюся въ состояніи закалки и отжига, соотвѣтственно 1) бронзу и 2) механическую смѣсь, изъ одной части стекла, истолченнаго въ мельчайшій, какъ пыль, порошокъ и шести частей свинца.

Такая смѣсь изъ стекляннаго порошка и большого избытка свинца, будучи, безъ сомнѣнія, менѣе гибкой и болѣе твердой, чѣмъ чистый свинецъ,

Гораздо большая твердость аустенита, чѣмъ смѣси феррита и цементита, на которую онъ распадается при медленномъ охлажденіи, достаточно объясняетъ хрупкость и твердость, которыя вызываетъ сохраненіе аустенита при быстромъ охлажденіи; всѣ согласны въ томъ, что это и служитъ причиной закалки, что же касается до состава аустенита, то на этотъ счетъ еще существуютъ разногласія.

200) Закалка усиливается по мѣрѣ того какъ температура закалки повышается въ критическомъ интервалѣ, но не зависитъ отъ температуры внѣ этого интервала.—Слѣдующая таблица указываетъ, какъ увеличиваются сопротивленіе разрыву и твердость стали съ 0,21% углерода съ повышеніемъ температуры закалки въ критическомъ интервалѣ (600° до 714°), какъ соотвѣтственно уменьшается тягучесть и какъ перлитъ и ферритъ постепенно замѣняются аустенитомъ (разновидностью мартенситъ). Таблица, далѣе, указываетъ, что разъ температура закалки выше интервала превращенія (733°), дальнѣйшее повышеніе остается безъ существеннаго вліянія на свойства закаленной стали.

201) Закалка неограниченно усиливается по мѣрѣ увеличенія скорости охлажденія.—Слѣдующая таблица служитъ иллюстраціей этого факта: (стр. 252, 253 и 254).

Здѣсь при самомъ быстромъ охлажденіи сопротивленіе на разрыву повысилось почти въ три раза, тогда какъ тягучесть, первоначально весьма значительная, почти свелась на нѣтъ.

Кромѣ того, видно, что по мѣрѣ увеличенія скорости охлажденія, сопротивленіе разрыву непрерывно возрастаетъ, тягучесть же уменьшается, при чемъ это уменьшеніе идетъ какъ бы скачкомъ.

202) Сходныя явленія при аллотропическихъ измѣненіяхъ.—Мы видѣли въ §§ 195 и 198, что явленія рекалесценціи

очевидно, должна быть несравненно мягче, чѣмъ бронза, несмотря на то, что стекло само по себѣ тверже бронзы. Точно также и смѣсь, которую изъ себя представляетъ отожженая сталь, состоящая изъ одной части цементита въ видѣ мельчайшихъ зеренъ и шести частей мягкаго, какъ мѣдь, феррита, конечно, гораздо мягче чѣмъ масса аустенита, изъ котораго состоитъ закаленная сталь, несмотря на то, что цементитъ въ отожженой стали самъ по себѣ тверже аустенита. Все дѣло въ томъ, что въ отожженой стали въ большомъ избыткѣ мягкаго феррита совершенно тонутъ микроскопическія частички цементита.

Влiянiе температуры закалки на физическiя свойства, состоянiе углерода

№	Температура закалки въ град. Ц.		Сопрот. разрыву въ фунт. на кв. дюймъ.	Твердость, ширина черты въ миллим.
6	880	Выше Ar_{2-3}	224,600	—
7	836		207,500	0,0276
4	797		218,200	0,0285
16	761		193,516	—
15	733		220,898	0,0290
12	714	Начало Ar_{2-3}	221,300	0,0281
18	713		211,316	0,0303
9	698	По срединѣ Ar_2 . . .	206,673	0,0293
5	652	между Ar_2 и Ar_1	145,000	—
14	650		142,000	0,0298
21	633		128,237	0,0333
10	626		125,756	0,0320
22	620	Начало Ar_1	121,058	0,0329
11	600	Конецъ Ar_1	91,600	0,0333
3	599		89,000	0,0332
8	575	Ниже Ar_1	93,400	0,0343
19	532		82,771	0,0343
13	512		82,100	0,0356
17	340		79,362	—
20	263		76,523	—
23	20		73,956	0,0365
24	Не были закалены.		93,707	—
25			94,340	0,0331
Общая потеря или прибыль.			150,644	0,0089

[1]) «Journ. Iron and Steel Inst.» 1896. I, стр. 171, табл. I.

Таблица 9.

и микростуктуру стали, содержащей 0,21% углерода [Howe и Sauveur [1]].

Удлиненіе.		Сокращеніе сѣченія въ процент.	Выгорѣвшій углеродъ, въ процент.	Микроструктурный составъ, въ проц.		
въ %	дюймы.			Мартенситъ.	Перлитъ.	Свободный ферритъ.
3,50	2,5	—	0,092 } Въ среднемъ 0,094	100		
3,00	4	5,00	0,095	100		
6,00	4	—	0,102	100		} 0
1,25	4	1,01	0,082	100		
4,50	4	—	0,095	100		
7,50	4	—	0,102	97,20		2,80
2,50	4	1,54	0,093	86,00	} 0	14,00
3,75	4	3,53	0,096	70,20		29,80
2,25	4	3,17	0,100	35,20		64,80
4,75	4	5,08	0,084	30,80		69,20
4,25	4	5,87	0,084	32,00		68,00
5,50	4	5,94	0,084	31,50		68,50
6,25	4	5,60	0,091	30,00	1,60	68,40
13,50	4	44,40	0,034	4,00	17,50	78,50
13,00	4	46,50	0,047	2,00	22,20	75,80
19,75	4	38,60	0,029		21,10	78,90
21,25	4	51,34	0,005		23,20	76,80
26,00	4	54,40	0,018	} 0	23,00	77,00
23,75	4	53,54	0,000		22,60	77,40
22,50	4	55,64	0,000		24,80	75,20
25,75	4	52,29	0,008		23,60	76,40
18,75	4	53,89	—	—	—	—
17,50	4	51,14	—	—	—	—
22,75	—	—	0,102	—	—	—

Таблица 10.

Вліяніе скорости охлажденія при закалкѣ на сталь, содержащую 0,21% углерода (авторъ).

Та же самая сталь, которая служила при изслѣдованіи, представленномъ на таблицѣ 9.

Сталь закалена	Сопротивленіе разрыву, въ фунт. на кв. дюймъ.	Предѣлъ упругости, въ фунт. на кв. дюймъ.	Удлиненіе въ проц. при 2 дюйм.	Сокращеніе сѣченія въ проц.
Во льду съ солью	237,555	237,170	2,0	1,30
Въ холодной водѣ	216,215	—	1,5	1,67
Въ маслѣ	174,180	—	2,9	1,403
На воздухѣ . . .	86,797	54,342	27,76	57,829
Въ печи	80,103	44,221	28,15	54,749

стали, переохлажденіе и слѣдующій за нимъ подъемъ температуры, имѣютъ большое сходство съ явленіями при замерзаніи какъ водныхъ растворовъ, такъ и расплавленныхъ металловъ и сплавовъ. Полезно замѣтить, что оба эти ряда явленій имѣютъ сходство съ явленіями при измѣненіяхъ аллотропическаго состоянія въ твердыхъ тѣлахъ. Такъ, въ случаѣ сѣры, нормальнымъ и стойкимъ при температурахъ между 95,6° и ея точкой плавленія является призматическое видоизмѣненіе, при болѣе же низкихъ температурахъ—октаедрическое (см. рис. 70). Если нагрѣть октаедрическую сѣру выше 95,6°, она переходитъ въ призматическую, не мгновенно, но тѣмъ скорѣе, чѣмъ выше температура; такимъ образомъ, чѣмъ скорѣе ведется нагрѣваніе, тѣмъ выше будетъ температура, при которой произойдетъ превращеніе. Наоборотъ, если охлаждать призматическую сѣру съ температуры выше 95,6°, она перейдетъ въ октаедрическую, и притомъ со скоростью, которая сперва увеличивается, по мѣрѣ того, какъ температура опускается все ниже и ниже 95,6°, достигаетъ максимума около 60°, и затѣмъ замедляется; благодаря этому, призматическая сѣра не испытываетъ сколько-нибудь

замѣтнаго превращенія, если ее очень быстро охладить до—30°, и сохраняется неопредѣленно долгое время [1]).

Условія, при которыхъ происходятъ эти превращенія, приблизительно слѣдующія. По охлажденіи до нормальной температуры превращенія, вещество стремится измѣнить свое состояніе. Этому противодѣйствуетъ какъ бы молекулярная инерція или нежеланіе атомовъ измѣнить свое первоначальное молекулярное распредѣленіе на иное, ставшее теперь нормальнымъ. По мѣрѣ того, какъ вещество охлаждается все ниже и ниже точки превращенія, стремленіе къ превращенію увеличивается; такимъ образомъ, стремленіе къ превращенію, моментъ превращенія, представляютъ собою произведеніе изъ нормальнаго стремленія къ превращенію при 95,6° на рычагъ температурнаго интервала, т. е. на то число градусовъ, на которое существующая температура ниже 95,6° или на нѣкоторую функцію этого рычага. Конечно, такого рода сравненіе не претендуетъ на большую точность.

Съ другой стороны, чѣмъ ниже температура, тѣмъ больше молекулярная неподвижность, молекулярная инерція, препятствующая превращенію. Отсюда ясно, что скорость превращенія сперва увеличивается по мѣрѣ того, какъ температура опускается ниже 95,6°, нормальной точки превращенія; затѣмъ, по мѣрѣ того, какъ возрастающая молекулярная неподвижность парализуетъ дѣйствіе увеличивающагося температурнаго рычага, скорость превращенія перестаетъ увеличиваться, т. е. достигаетъ максимума; затѣмъ скорость превращенія уменьшается, становясь, въ случаѣ сѣры, равной нулю при — 30°, въ случаѣ же стали при комнатной температурѣ или нѣсколько выше.

При нагрѣваніи же октаедрической сѣры выше точки превращенія 95,6°, повышеніе температуры увеличиваетъ температурный рычагъ и одновременно уменьшаетъ молекулярную неподвижность, такъ что съ повышеніемъ температуры моментъ превращенія возрастаетъ неограниченно (конечно, при точкѣ плавленія онъ исчезаетъ).

---

[1]) Эти указанія относительно сѣры основываются на данныхъ Le Chatelier, «Revue Gen. des Sciences», 1897, стр. 13, гдѣ можно найти также весьма ясный обзоръ теорій закалки стали. Согласно болѣе старымъ опредѣленіямъ, за нормальную область существованія призматической сѣры принималась температура отъ 100° до 114° или отъ 105° до 115°.

Рис. 70 представляетъ собой попытку представить ходъ этого явленія.

Столбецъ 1 указываетъ на интенсивность стремленія къ превращенію, которое возрастаетъ съ увеличеніемъ рычага, представляющаго собой температурное разстояніе отъ 95,6°; столбецъ 2 указываетъ на интенсивность сопротивленія превращенію при данной температурѣ; столбецъ 3 указываетъ на скорость, съ которою въ дѣйствительности происходитъ превращеніе,

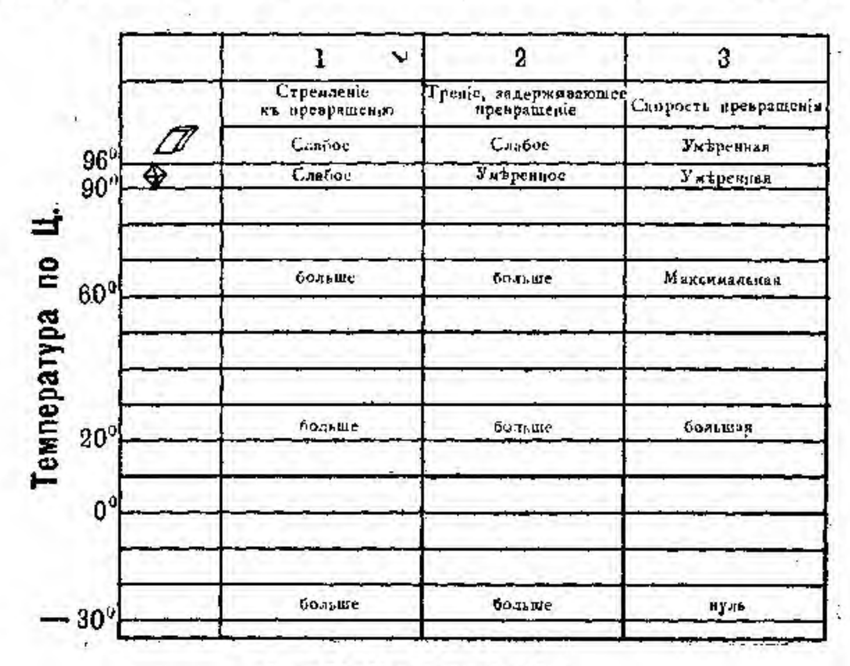


Рис. 70. Превращенія сѣры.

скорость, опредѣляемую отношеніемъ между стремленіемъ къ превращенію и испытываемымъ имъ сопротивленіемъ.

Тѣ же явленія наблюдаются при закалкѣ и рекалесценціи стали. 1) Чѣмъ скорѣе охлажденіе, тѣмъ ниже температура, при которой происходитъ рекалесценція. 2) Достаточно быстрое охлажденіе задерживаетъ превращеніе почти совершенно или, по крайней мѣрѣ, въ очень сильной степени. 3) Сталь, у которой оно было такимъ образомъ задержано, остается неопредѣленно долгое время безъ измѣненія при комнатной температурѣ, т. е. превращеніе при этой температурѣ не происходитъ сколько-нибудь замѣтно или даже совсѣмъ. 4) Превращеніе при нагрѣваніи,

т. е. превращеніе перлита въ аустенитъ, происходитъ при гораздо болѣе высокой температурѣ, чѣмъ рекалесценція или превращеніе при охлажденіи; разница составляетъ обыкновенно 30°—40° и сильно зависитъ отъ скорости охлажденія. 5) Воззрѣніе, что молекулярное треніе или неподвижность повышается съ пониженіемъ температуры, подтверждается еще и съ другой стороны. Превращеніе при охлажденіи совершается обыкновенно при температурѣ настолько болѣе низкой, чѣмъ нормальная температура превращенія, что, разъ начавшись, оно идетъ подъ вліяніемъ болѣе длиннаго температурнаго рычага съ такою быстротою, что выдѣляющееся тепло можетъ поднять температуру приблизительно на 10° [1]). Обратное превращеніе при подъемѣ температуры, которое должно было бы сопровождаться одинаковымъ поглощеніемъ тепла, происходитъ при температурѣ настолько болѣе близкой къ нормальной температурѣ превращенія, что охлажденіе (если можно такъ назвать пониженіе температуры на нѣсколько градусовъ при красномъ каленіи) бываетъ сравнительно слабо и выражается часто только простымъ замедленіемъ въ подъемѣ температуры.

203) Аналогія для иллюстраціи стремленія къ превращенію.—При быстромъ охлажденіи стали или сѣры мы имѣемъ дѣло съ двумя противоположными силами, съ стремленіемъ, обнаруживаемымъ запоздавшимъ превращеніемъ къ тому, чтобы произойти, и съ направленной противъ него молекулярной неподвижностью, вызываемой низкой температурой. Первое повышается съ увеличеніемъ температурнаго рычага, выражающаго собой разстояніе отъ истинной точки превращенія; вторая усиливается съ пониженіемъ температуры и въ концѣ концовъ парализуетъ первое.

Приводимое ниже сравненіе можетъ помочь усвоить себѣ это воззрѣніе, но я не думаю, чтобы природа явленія, названнаго нами «молекулярной неподвижностью», намъ при этомъ стала яснѣе.

Я сплю на землѣ, истощенный усталостью. Меня будятъ; въ пятидесяти шагахъ отъ меня я вижу разложенный костеръ. Мнѣ

---

[1]) Osmond, «Contribution à l'Etude des Alliages», стр. 376, 1901; «The Metallographist», IV, стр. 158, 1901; авторъ, «Trans. Am. Inst. Mining Engineers». XXIII, стр. 484—488, 1893.

немного холодно; мнѣ хотѣлось бы подойти къ огню, но стоитъ ли? Только послѣ нѣкоторой борьбы я поднимаюсь и иду къ огню.

На слѣдующій вечеръ меня будятъ при подобныхъ же условіяхъ; но въ этотъ разъ очень холодно; хотя и неохотно, я встаю и иду къ огню.

Въ слѣдующій разъ я дрожу отъ холода, какъ вдругъ кто-то обливаетъ меня ледяной водой; озябшій и мокрый, я бѣгу къ огню.

Въ слѣдующій разъ кто-то толкаетъ и будитъ меня; я совершенно окоченѣлъ; въ моемъ сознаніи мелькаетъ, что нужно во что бы то ни стало согрѣться; если я не подойду къ огню, то я умру; но я настолько окоченѣлъ, что не въ состояніи встать; я опять засыпаю.

Въ каждомъ изъ этихъ случаевъ мотивомъ, заставляющимъ встать и подойти къ огню, является желаніе согрѣться; этому каждый разъ противодѣйствуетъ инерція, при чемъ въ послѣднемъ случаѣ она настолько усиливается подъ вліяніемъ холода, что совершенно парализуетъ возможность удовлетворить желаніе.

204) Наблюденія, подтверждающія эту теорію.—Что причиной закалки стали служитъ сохраненіе аустенита, на это имѣются различныя доказательства; за это говорятъ, напримѣръ, данныя въ §§ 200 и 201, а также и другіе опыты автора, къ разсмотрѣнію которыхъ мы сейчасъ перейдемъ. Если сталь съ 1,00% углерода осторожно нагрѣть до 700° и затѣмъ быстро охладить въ водѣ, она не закалится. Если, съ другой стороны, ту же сталь нагрѣть до значительно болѣе высокой температуры, скажемъ до 880°, затѣмъ медленно охладить до 700° и при 700° быстро охладить въ водѣ, тогда она закалится. Это очень просто объясняется. Въ первомъ случаѣ не произошло еще превращенія феррита и цементита къ аустенитъ; сталь въ моментъ быстраго охлажденія состояла еще изъ феррита и цементита. Во второмъ случаѣ, хотя температура, при которой производится быстрое охлажденіе, та же, что и въ первомъ случаѣ, и по всей вѣроятности на нѣсколько градусовъ ниже нормальной температуры превращенія, однако превращеніе [реакція 9) или 11)] вслѣдствіе замедленія еще не успѣло произойти, т. е. аустенитъ еще не превратился въ ферритъ и цементитъ; аустенитъ сохраняется подъ вліяніемъ быстраго охлажденія, что̀ и обусловли-

ваетъ закалку стали. Вообще, авторъ нашелъ, что сталь всегда закаливается, если ее быстро охладить прежде, чѣмъ произойдетъ рекалесценція, независимо отъ того, при какой температурѣ производить быстрое охлажденіе. Съ другой стороны, сталь не закаливается при быстромъ охлажденіи даже съ болѣе высокихъ температуръ, если передъ тѣмъ не произошло превращенія перлита въ аустенитъ, т. е. если при охлажденіи металлъ не находится въ состояніи аустенита [1]).

Только сохранивъ такимъ образомъ аустенитъ путемъ быстраго охлажденія, мы получаемъ возможность изучать его при обыкновенной температурѣ. Однако сохранить аустенитъ въ чистомъ видѣ никогда не удается. Какъ бы быстро ни вести охлажденіе, аустенитъ настолько измѣняется въ сторону состоянія феррита и цементита, что достигаетъ по крайней мѣрѣ степени разложенія, называемой мартенситомъ. Вмѣсто чистаго, не обладающаго магнитными свойствами аустенита, вслѣдствіе возникновенія феррита и цементита, получается масса, обладающая, взятая въ цѣломъ, способностью сильно намагничиваться.

Итакъ, закалка стали состоитъ въ томъ, что послѣдняя остается въ состояніи аустенита подъ вліяніемъ настолько быстраго охлажденія, что аустенитъ не успѣваетъ перейти въ перлитъ и т. д. Мы принимаемъ, что это превращеніе при полномъ охлажденіи металла не происходитъ потому, что молекулы аустенита, удерживаются въ неустойчивомъ состояніи, благодаря неподвижности, вызываемой низкой температурой.

205) Отпускъ закаленной стали вызывается слабымъ нагрѣваніемъ до 220°—320°; при этихъ температурахъ на поверхности металла образуется слой окиси, цвѣтъ котораго мѣняется отъ свѣтло-желтаго до темно-синяго. Отпускъ, повидимому, состоитъ въ томъ, что слегка нарушается молекулярная неподвижность, при чемъ молекулы пріобрѣтаютъ достаточную свободу перемѣщенія для того, чтобы часть нестойкаго аустенита могла послѣдовать своему естественному стремленію и перейти въ перлитъ, и т. д. Иначе говоря, при отпускѣ происходятъ тѣ

---

[1]) «Trans. Am. Inst. of Min. Eng.» XXIII, 1893, стр. 498—520.

Osmond уже раньше получилъ серьезныя указанія на то, что потеря способности закаливаться совпадаетъ съ рекалесценціей («Transformations du Fer et du Carbone», стр. 38 и 87, 1888).

превращенія, которыя должны были бы произойти при охлажденіи въ областяхъ V и VII, если бы оно велось достаточно медленно.

Чѣмъ выше нагрѣваніе, тѣмъ больше нарушается молекулярная неподвижность, препятствующая переходу стали изъ ненормальнаго состоянія аустенита въ нормальное состояніе феррита и цементита. По этой причинѣ, нагрѣваніе до 66° вызываетъ очень слабый отпускъ; нагрѣваніе же до 230° (образующійся при этой температурѣ слой окиси желѣза на полированной поверхности металла обладаетъ соломенно-желтымъ цвѣтомъ) вызываетъ гораздо болѣе сильный отпускъ, и металлъ становится гораздо менѣе хрупкимъ, чѣмъ послѣ закалки. Нагрѣваніе до 300° (при этой температурѣ слой окиси принимаетъ синій цвѣтъ) вызываетъ еще большій отпускъ и еще большее пониженіе хрупкости и твердости, вызванныхъ предыдущей закалкой.

Сталь, отпущенная при 230°, примѣняется для такихъ инструментовъ, какъ бритвы, ланцеты и т. п., отъ которыхъ требуется большая твердость, для того, чтобы они могли хорошо рѣзать. Въ нихъ допускается извѣстная степень хрупкости, потому что они не подвергаются сотрясеніямъ. Съ другой стороны, если бы отпустить только до 230°, положимъ, сверло, примѣняемое для сверленія твердыхъ горныхъ породъ, или рѣзецъ, они были бы слишкомъ хрупки для того, чтобы выдерживать тѣ сотрясенія, которымъ они подвергаются. Поэтому ихъ приходится отпускать больше, нагрѣвая, скажемъ, до 300°, для того, чтобы понизить ихъ хрупкость. Конечно, при этомъ мы уменьшаемъ ихъ твердость и рѣжущую способность, но это меньшее изъ двухъ золъ. Приходится мириться съ уменьшеніемъ твердости, чтобы достигнуть допустимой степени хрупкости.

206) Отжигъ закаленной стали состоитъ въ нагрѣваніи ея до темно-краснаго каленія и послѣдующемъ медленномъ охлажденіи; при этомъ превращеніе аустенита въ перлитъ и т. д. доходитъ до конца.

Кромѣ того, вслѣдствіе пластичности, пріобрѣтаемой металломъ при нагрѣваніи до-красна, пропадаетъ то натяженіе (§ 210), которое въ немъ возникаетъ при закалкѣ, вслѣдствіе того, что различные слои при очень быстромъ охлажденіи, охлаждаются съ различной скоростью. Накаленный до-краска пла-

стичный металлъ растягивается подъ вліяніемъ натяженія, благодаря чему послѣднее и исчезаетъ. Медленное охлажденіе послѣ отжига, сопровождаемое болѣе равномѣрнымъ сокращеніемъ различныхъ слоевъ, препятствуетъ возникновенію новыхъ натяженій. Кромѣ того, если температура отжига выше A_1, происходитъ соединеніе слоевъ феррита и цементита, изъ которыхъ состоитъ перлитъ, и образуется аустенитъ. Это соединеніе сопровождается молекулярнымъ перемѣщеніемъ, которое, несмотря на незначительность проходимыхъ молекулами разстояній, повидимому, сглаживаетъ неравномѣрность, имѣющуюся въ строеніи, и уничтожаетъ вызываемую ею ломкость.

207) Сравненіе, служащее для поясненія явленій отпуска и отжига.—Въ § 203 было приведено сравненіе, цѣль котораго заключалась въ томъ, чтобы дать болѣе ясное представленіе относительно борьбы между стремленіемъ закаленной стали перейти изъ состоянія аустенита въ состояніе феррита и цементита, и сопротивленіемъ, которое этому оказываетъ молекулярная неподвижность, вызываемая низкой температурой. Иными словами, мы старались дать картину тѣхъ условій, которыя существуютъ какъ при закалкѣ стали, такъ и въ закаленной стали.

Оставаясь при тѣхъ же общихъ воззрѣніяхъ на стремленіе къ превращенію и на препятствующее ему молекулярное треніе, приведемъ еще одно сравненіе, цѣль котораго состоитъ въ томъ, чтобы пояснить явленія отпуска и отжига и ихъ отличіе отъ явленій закалки. Повторяемъ, въ закаленной стали молекулы находятся въ состояніи аустенита, которое является ненормальнымъ ниже интервала превращенія; естественному стремленію ихъ перейти въ ферритъ и цементитъ препятствуетъ молекулярное треніе.

Такое состояніе можно сравнить съ состояніемъ натянутаго лука, удерживаемаго треніемъ.

Положимъ, что треніе приложено къ стрѣлѣ, удерживающей лукъ въ натянутомъ положеніи, какъ указано на рис. 71. Конечно, аналогія была бы болѣе близкой, если бы мы предположили, что треніе приложено непосредственно къ луку, а не при помощи стрѣлы. Это было бы однако гораздо труднѣе представить на рисункѣ.

Концы лука A и B поддерживаются роликомъ C и D, на которыхъ лукъ свободно скользитъ. Стрѣла удерживается тре-

ніемъ въ зажимѣ E. Лукъ, будучи совершенно свободенъ, выпрямился бы и принялъ бы положеніе, указанное на рис. 72. Стремленію выпрямиться препятствуетъ треніе, оказываемое E.

Въ закаленной стали стремленіе перейти изъ аустенита въ ферритъ и цементитъ можно уподобить стремленію лука выпря-

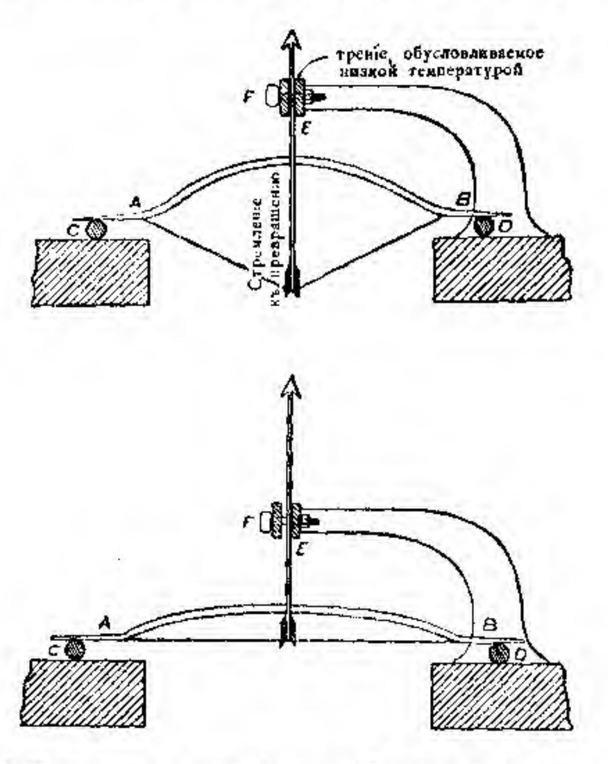


Рис. 71 и 72. Модель, для поясненія явленій, происходящихъ при отпускѣ закаленной стали.

миться; молекулярное же сопротивленіе можно уподобить тренію, оказываемому зажимомъ E.

Повернувъ нѣсколько винтъ F, мы слегка уменьшимъ треніе, оказываемое E, лукъ начнетъ выпрямляться и стрѣла немного продвинется въ E. При этомъ натяженіе лука, его стремленіе выпрямиться, ослабнетъ. Согласно закону Hook'а—«ut tensio sic vis», чѣмъ больше выпрямляется лукъ, тѣмъ меньше становится его стремленіе къ дальнѣйшему выпрямленію. Очень скоро это стремленіе падаетъ до такой степени, что тренія E оказывается достаточно, чтобы его уравновѣсить, и лукъ перестаетъ выпря-

мляться. Освободимъ еще немного E, и лукъ вновь начнетъ выпрямляться; выпрямленіе вновь прекращается, какъ только натяженіе лука дѣлается настолько малымъ, что тренія въ E оказывается достаточно для того, чтобы его уравновѣсить.

Съ подобными же условіями мы имѣемъ дѣло и въ закаленной стали. Нагрѣвъ сталь до 66°, мы слегка уменьшаемъ сопротивленіе, которое низкая температура оказываетъ переходу аустенита въ ферритъ и цементитъ (реакція 9) или 11); вслѣдствіе же уменьшенія сопротивленія, эта реакція тотчасъ начинается. По мѣрѣ ея дальнѣйшаго хода, количество аустенита становится меньше, и стремленіе аустенита перейти обратно въ ферритъ и цементитъ постепенно падаетъ. Чѣмъ меньше остается аустенита, тѣмъ меньше стремленіе этого аустенита перейти въ ферритъ и цементитъ, тѣмъ съ большею легкостью борется съ этимъ стремленіемъ молекулярное сопротивленіе, обусловливаемое низкой температурой. При нагрѣваніи свыше 66°, скажемъ до 200°, мы еще больше ослабляемъ молекулярное сопротивленіе, и опять извѣстная часть аустенита переходитъ въ ферритъ и цементитъ. Но этотъ переходъ вновь прекращается, какъ только количество остающагося аустенита становится настолько малымъ, что его стремленіе къ дальнѣйшему переходу въ ферритъ и цементитъ вновь уравновѣшивается ослабленнымъ сопротивленіемъ, соотвѣтствующимъ температурѣ 200°.

Нагрѣемъ сталь до 600°, и молекулярное сопротивленіе дальнѣйшему переходу становится совершенно незначительнымъ; повидимому, весь остающійся аустенитъ переходитъ въ ферритъ и цементитъ. Реакція 9) или 11), которая должна была произойти при охлажденіи въ критическомъ интервалѣ, но которой для этого не было дано достаточно времени, теперь идетъ до конца, и сталь приходитъ въ то состояніе, въ которомъ она должна была бы находиться, если бы охлажденіе велось медленно, а не очень быстро; сталь отожжена.

208) Почему скорость охлажденія послѣ отпуска безразлична.—При закалкѣ стали, охлажденіе съ температуры выше критическаго интервала должно быть по необходимости очень быстрымъ, для того, чтобы воспрепятствовать стремленію аустенита перейти въ ферритъ и цементитъ, возникающему, какъ только температура падаетъ ниже Ar_1. Закалка, слѣдовательно, состоитъ въ предотвращеніи или въ сильномъ ограниченіи этого

превращенія. Но нагрѣемъ закаленный кусокъ стали, скажемъ, до 200° и тѣмъ самымъ дадимъ возможность задержанному превращенію произойти до той степени, до которой это ему позволяетъ уменьшившееся молекулярное треніе, соотвѣтствующее 200°; послѣ этого вести охлажденіе быстро нѣтъ никакой нужды, развѣ только для удобства. При 200° превращеніе происходитъ съ чрезвычайной быстротой до той степени, до которой это позволяетъ температура. Если держать сталь при 200° въ теченіе часа, превращеніе не пойдетъ замѣтно дальше, чѣмъ въ первыя нѣсколько секундъ.

Какъ только мы станемъ охлаждать сталь, какъ только температура начнетъ падать ниже 200°, молекулярное треніе начнетъ увеличиваться, и, конечно, превращеніе не будетъ въ состояніи идти дальше. Если тренія при 200° уже было достаточно для того, чтобы остановить дальнѣйшее превращеніе, конечно, оно не можетъ идти дальше при большемъ треніи, соотвѣтствующемъ 199°. Такимъ образомъ, при этомъ охлажденіи, будь оно быстро или медленно, никакого превращенія не происходитъ. Отсюда слѣдуетъ, что въ данномъ случаѣ скорость охлажденія безразлична.

Почти то же самое можно сказать и относительно охлажденія послѣ отжига, если только температура, достигаемая при отжигѣ, не простирается въ интервалъ превращенія (области V и VII); ибо, при подъемѣ температуры выше Ac_1, по крайней мѣрѣ, часть феррита и цементита, изъ которыхъ металлъ состоитъ при нагрѣваніи до 500° или 600°, должна будетъ перейти въ аустенитъ. Если нагрѣваніе при отжигѣ не достигаетъ интервала превращенія, тогда скорость послѣдующаго охлажденія относительно безразлична, за исключеніемъ того, что быстрое охлажденіе съ такой высокой температуры, какъ 600°, можетъ вызвать сильное внутреннее натяженіе. При быстромъ охлажденіи, охлажденіе внутреннихъ частей должно сильно отставать отъ внѣшнихъ; это обстоятельство должно вызвать неравномѣрное сокращеніе въ различныхъ слояхъ, которое и выражается въ внутреннемъ натяженіи.

На діаграммѣ, представленной на рис. 73, схематически выражено высказанное нами положеніе, что въ то время, какъ скорость охлажденія съ температуры, лежащей выше или въ интервалѣ превращенія, до обыкновенной температуры играетъ

большую роль, скорость охлажденія съ температуры, лежащей ниже этого интервала, относительно безразлична.

209) Повѣрка положенія, что способность принимать закалку исчезаетъ при рекалесценціи.—Рекалесценцію сопровождаетъ появленіе магнитныхъ свойствъ, которое происходитъ въ то время, какъ желѣзо переходитъ изъ аллотропическаго состоянія, при которомъ магнитныя свойства отсутствуютъ, въ нормальное для комнатной температуры состояніе, при которомъ

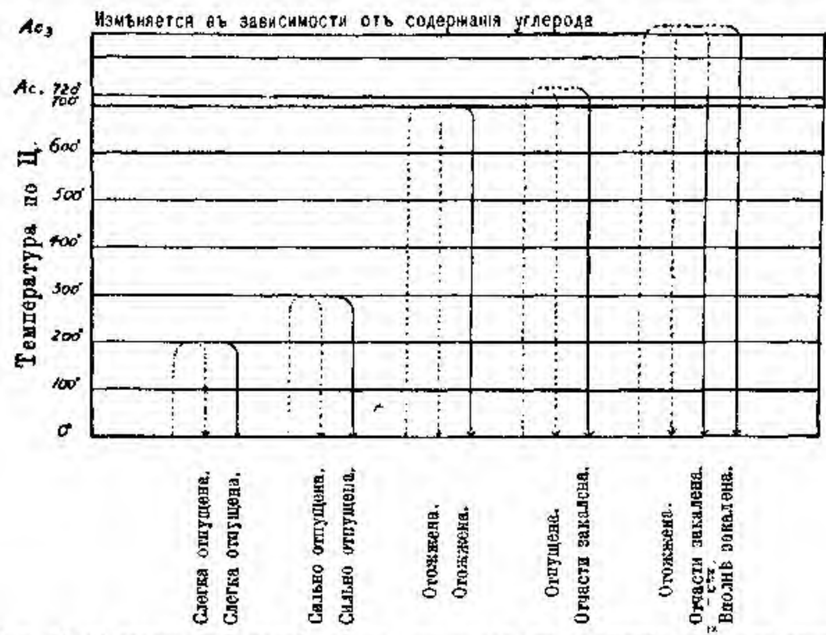


Рис. 73. Скорость охлажденія ниже интервала превращенія несущественна, выше его—играетъ рѣшающую роль.

Примѣчаніе. Предполагается, что во всѣхъ случаяхъ сталь была закалена, прежде чѣмъ подвергнуться указанной здѣсь обработкѣ. Сплошныя линіи представляютъ быстрыя измѣненія температуры, пунктирныя—медленныя. Подъ стрѣлками указано конечное состояніе металла послѣ температурныхъ измѣненій, которымъ онъ подвергся, и на которыя указываютъ линіи, ведущія къ стрѣлкамъ.

эти свойства очень сильны. Это можно показать при помощи очень простого опыта. Прикрѣпимъ къ проволокѣ изъ высокоуглеродистой стали, лучше всего изъ эвтектоидной стали (0,90% углерода), имѣющей $^1/_{16}$ дюйма въ діаметрѣ, тонкую проволоку, платиновую или изъ марганцовой стали. Ни мѣдная проволока, ни обыкновенная желѣзная не годятся, потому что у первой слишкомъ большая теплопроводность, вторая же сама обладаетъ магнитными свойствами.

Нагрѣемъ стальную проволоку до желтаго каленія въ пламени Бунзеновской горѣлки и поднесемъ ее къ магнитной стрѣлкѣ, не защищенной стекломъ. Сперва проволока не притягиваетъ стрѣлки, но затѣмъ, при охлажденіи, она вдругъ пріобрѣтаетъ магнитныя свойства и въ то же время замѣтно накаляется, т. е. происходитъ рекалесценція. Это лучше всего наблюдать въ темной комнатѣ, хотя опытный глазъ можетъ подмѣтить рекалесценцію даже и на свѣту.

Закаливъ рядъ проволокъ выше рекалесценціи, во время ея и ниже, затѣмъ опредѣливъ ихъ тягучесть путемъ сгибанія и ихъ твердость напилкомъ, легко убѣдиться, что возстановленіе магнитныхъ свойствъ при рекалесценціи сопровождается потерею способности принимать закалку. Но эти превращенія происходятъ въ значительномъ температурномъ интервалѣ, такъ какъ проволока окончательно теряетъ способность закаливаться только по охлажденіи на много градусовъ ниже рекалесценціи, приблизительно черезъ пятнадцать секундъ послѣ того, какъ начали проявляться ея магнитныя свойства [1]).

210) Напряженіе въ закаленной стали.—Аустенитъ самъ по себѣ чрезвычайно твердое и хрупкое вещество. Однако, хрупкость закаленной стали несомнѣнно до извѣстной степени зависитъ отъ натяженія, вызываемаго быстрымъ охлажденіемъ. Это же натяженіе въ сильной степени зависитъ отъ того, что при быстромъ охлажденіи, охлажденіе внутренней части даннаго предмета сильно отстаетъ отъ охлажденія внѣшней его части; къ концу охлажденія, когда внѣшняя часть уже совсѣмъ охладилась, внутренняя часть еще находится при значительно болѣе высокой температурѣ. Охлажденіе ея должно сопровождаться соотвѣтствующимъ сокращеніемъ объема. Этому препятствуетъ, однако, неподвижная внѣшняя часть, съ которой внутренняя часть неразрывно связана. Отсюда слѣдуетъ, что внѣшняя часть должна находиться въ состояніи сжатія, внутренняя же часть въ состояніи натяженія. Въ этомъ можно убѣдиться, надпиливъ кусокъ закаленной стали, положимъ, съ 0,20% углерода. Пока такой кусокъ стали не надпиленъ, напряженія, существующія въ немъ, уравновѣшиваются, будучи направлены почти симметрично, и не вызываютъ въ общемъ большой деформаціи. Надпиливъ такой

---

[1]) «Metallurgical Laboratory Notes», авторъ, опытъ 2. стр. 10.

кусокъ, мы нарушаемъ равновѣсіе, и нѣкоторыя изъ напряженій, не будучи больше уравновѣшены, вызываютъ дальнѣйшее измѣненіе его формы.

Какъ сейчасъ будетъ указано, напряженіе въ закаленной стали въ значительной степени зависитъ еще и отъ другого обстоятельства. Даже при очень быстромъ охлажденіи значительная часть аустенита превращается въ ферритъ и цементитъ, въ особенности въ внутренней части куска, которая охлаждается гораздо медленнѣе, чѣмъ внѣшняя. До какой степени происходитъ это превращеніе, до той же запаздываетъ охлажденіе и обусловливаемое послѣднимъ сокращеніе слоя, въ которомъ идетъ превращеніе. Охлажденіе внутренней части всегда отстаетъ отъ внѣшней, вслѣдствіе чего запозданіе сокращенія внутренней части должно происходить позже, чѣмъ соотвѣтствующее, хотя и менѣе значительное, запозданіе сокращенія внѣшней части. Другими словами, въ то время какъ сокращеніе внѣшней части, послѣ небольшого запозданія, идетъ съ нормальной скоростью, сокращеніе внутренней части испытываетъ наибольшее запозданіе. Не имѣя возможности сокращаться нормальнымъ образомъ, внѣшняя часть подвергается опасности дать трещину.

211) Сравненіе, служащее для поясненія внутренняго напряженія.—Постараемся при помощи сравненія пояснить наше воззрѣніе на напряженіе, существующее между различными слоями въ кускѣ закаленной стали или другого вещества. Предположимъ, что подъ вліяніемъ какой-либо болѣзни у меня распухли обѣ руки до двойного объема противъ нормальнаго, при чемъ, однако, сохранилась ихъ нормальная форма. Предположимъ далѣе, что я надѣну желѣзную перчатку, которая приходится точно впору на мою распухшую правую руку; предположимъ также, что перчатка эта надѣвается на руку съ какимъ-либо клеемъ, такъ что рука и перчатка оказываются крѣпко связанными между собой. Затѣмъ представимъ себѣ, что эта болѣзнь проходитъ, и что лѣвая рука принимаетъ нормальный объемъ. Очевидно, правая рука, равнымъ образомъ, будетъ стремиться сократиться до нормальнаго объема, но этому будетъ препятствовать клей, крѣпко ее связывающій съ несжимаемой желѣзной перчаткой. Моя рука, стремясь принять нормальный объемъ, будетъ находиться въ состояніи напряженія; подъ вліяніемъ этого напряженія перчатка будетъ испытывать сжатіе.

Между рукой и перчаткой возникаетъ состоянiе постояннаго напряженiя. Подобное же состоянiе существуетъ и между различными слоями въ закаленной стали.

212) Напряженiе можетъ оказывать различное влiянiе.— Разсмотримъ теперь другой случай, гитары, струны которой натянуты обычнымъ образомъ. Струны такой гитары, стремясь сократиться, очевидно, находятся въ состоянiи натяженiя; этому препятствуетъ неподвижность корпуса гитары. Слѣдовательно, тѣло гитары находится въ состоянiи сжатiя. Стрѣлки на рис. 74 указываютъ на направленiе напряженiя въ струнахъ и въ тѣлѣ гитары. Многiе изъ насъ знаютъ по опыту, что если оставить настроенную гитару на сыромъ воздухѣ, не освободивъ изъ предосторожности струны, то послѣднiя могутъ лопнуть. Это происходитъ вслѣдствiе того, что подъ влiянiемъ сырости увеличивается стремленiе струны къ сокращенiю, которому противодѣйствуетъ корпусъ гитары. Стремленiе къ сокращенiю выражается въ увеличенiи натяженiя, которое въ концѣ концовъ усиливается до такой степени, что струны лопаются. Совершенно то же самое можно наблюдать и при слишкомъ быстромъ охлажденiи при закалкѣ стали; можно вызвать такое сильное напряженiе въ внѣшнемъ слоѣ, что онъ лопнетъ, подобно струнамъ гитары.

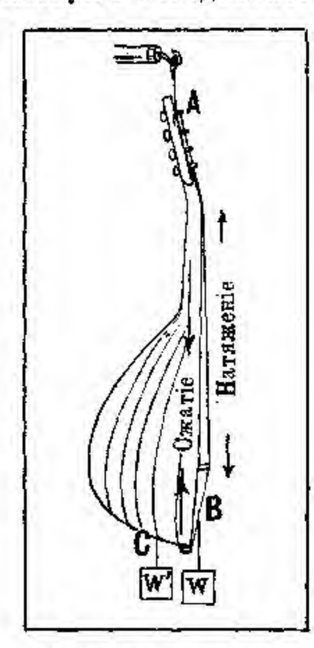


Рис. 74. Влiянiе внутренняго напряженiя на прочность, т. е. на способность противустоять внѣшнимъ напряженiямъ.

Положимъ, что гитара находится въ состоянiи напряженiя, указанномъ на рис. 74. Подвѣсимъ ее въ точкѣ A и прикрѣпимъ къ одной изъ струнъ въ B грузъ W, точно представляющiй собой грузъ, который можетъ выдержать струнэ, не находящаяся въ состоянiи натяженiя. Струна лопнетъ. Ясно, если я обладаю достаточной силой, чтобы поднять 1000 фунтовъ, но не болѣе, и если мнѣ положатъ на плечи 500 фунтовъ, у меня останется достаточно силы для того, чтобы поднять еще только

500 фунтовъ. Если половина моей силы уходитъ на то, чтобы поддерживать на плечахъ грузъ, я могу располагать только остающейся половиной моей силы для того, чтобы поднять нѣкоторую добавочную тяжесть. Точно также и у струны сопротивленіе разрыву уменьшается постольку, поскольку она находится въ состояніи натяженія. Положимъ, далѣе, что мы подвѣсимъ грузъ W' къ тѣлу гитары въ точкѣ C. Въ силу того, что тѣло гитары находится въ состояніи сжатія, оно можетъ выдержать бо́льшій грузъ, чѣмъ не находясь въ состояніи сжатія.

Посмотримъ теперь, какова же прочность гитары, т. е. способность ея противустоять грузу, приложенному извнѣ, если разсматривать ее, какъ одно цѣлое. Оказывается, что степень вліянія внутренняго напряженія на способность противустоять грузу, приложенному извнѣ, зависитъ отъ точки приложенія груза. Внутреннее напряженіе ослабляетъ гитару въ томъ случаѣ, если грузъ прилагается къ той части гитары, которая находится въ состояніи натяженія. Съ другой стороны, внутреннее напряженіе способствуетъ ея прочности, если грузъ прилагается къ той части гитары, которая находится въ состояніи сжатія. Такимъ образомъ, оказывается, что внутреннее напряженіе можетъ даже усиливать данный предметъ, взятый въ цѣломъ, въ отношеніи способности его противостоять внѣшнему напряженію, прилагаемому опредѣленнымъ образомъ.

Нагрузимъ, теперь, гитару равномѣрно, т. е. возьмемъ грузъ W', точно равный тому, который можетъ выдержать корпусъ гитары, свободный отъ напряженія, и грузъ W, въ свою очередь равный тому, который въ состояніи выдержать струна, точно также свободная отъ напряженія. Вслѣдствіе того, что струна находится въ состояніи натяженія, она должна лопнуть. Весь грузъ $W+W'$ перенесется на корпусъ гитары, которая равнымъ образомъ должна сломаться.

Прочность даннаго стального предмета можно опредѣлить, какъ способность противустоять внѣшнему напряженію. Если примѣненіе даннаго стального предмета должно происходить при цѣломъ рядѣ условій, точно заранѣе не опредѣленныхъ, тогда, вообще говоря, лучше, чтобы онъ былъ хорошо приспособленъ къ тому, чтобы противустоять какой угодно возможной системѣ внѣшнихъ напряженій, вмѣсто того, чтобы обладать очень боль-

шой способностью противустоять какой-либо одной системѣ внѣшнихъ напряженій, приложенной извѣстнымъ образомъ, и очень малой способностью противустоять другой возможной системѣ внѣшнихъ напряженій, приложенной другимъ образомъ. Поэтому, присутствіе внутренняго напряженія въ стальномъ предметѣ можетъ быть иногда полезнымъ; напримѣръ въ кольцахъ, которыми скрѣпляются орудія, направленіе внѣшнихъ напряженій совершенно ясно, а потому внутреннее напряженіе въ нихъ можетъ быть очень цѣннымъ и можетъ въ сильной степени способствовать ихъ прочности. Но внутреннее напряженіе въ общемъ нежелательно въ тѣхъ предметахъ, которые при употребленіи могутъ подвергаться очень различнымъ и неопредѣленнымъ сильнымъ внѣшнимъ напряженіямъ.

Прежде полагали, что закалка стали обусловливается тѣми напряженіями, которыя въ ней возникаютъ при быстромъ охлажденіи. Но хотя, безъ сомнѣнія, напряженіе существуетъ и въ значительной степени способствуетъ хрупкости, однако совершенно ясно, что оно не служитъ причиной закалки стали. Доводовъ очень много, но изъ нихъ достаточно привести два.

Во-первыхъ, если бы закалка вызывалась напряженіемъ, она должна была бы усиливаться параллельно съ повышеніемъ температуры, при которой производится быстрое охлажденіе, т. е. съ температурой закалки. На самомъ дѣлѣ этого не только не наблюдается, но настоящей закалки не происходитъ до тѣхъ поръ, пока температура, при которой производится быстрое охлажденіе, не достигнетъ интервала превращенія. Болѣе того, по минованіи этого интервала, дальнѣйшее повышеніе температуры закалки не усиливаетъ закалки. Другими словами, способность принимать закалку возникаетъ въ критическомъ интервалѣ. Въ случаѣ эвтектоидной стали, т. е. стали съ 0,90% углерода, способность принимать закалку возникаетъ и достигаетъ максимума въ очень незначительномъ температурномъ интервалѣ.

Другой доводъ тотъ, что если бы закалка обусловливалась напряженіемъ, тогда и другіе металлы должны были бы закаливаться при быстромъ охлажденіи. Однако на самомъ дѣлѣ это не такъ. Подъ вліяніемъ быстраго охлажденія, марганцовая сталь становится очень тягучей, вмѣсто того, чтобы становиться хрупкой, подобно углеродистой стали. Тотъ фактъ, что способность закаливаться составляетъ особое свойство, присущее глав-

нымъ образомъ соединеніямъ углерода съ желѣзомъ, и наблюдается, повидимому, у очень малаго числа иныхъ веществъ, уже самъ по себѣ является достаточнымъ доказательствомъ того, что закалка не обусловливается напряженіемъ. Оглядываясь назадъ, нельзя не удивляться, какимъ образомъ въ теченіе долгаго періода времени такіе выдающіеся писатели могли объяснять закалку внутреннимъ напряженіемъ.

Тепловая обработка стали. Процессы, основанные главнымъ образомъ на контролѣ структуры.

213) Важность изученія структуры.—Структура стали, зависимость между структурой и свойствами стали, вліяніе тепловой и механической обработки на структуру, — все это, вѣроятно, практически гораздо важнѣе для молодого инженера, чѣмъ всѣ остальные вопросы, разсмотрѣнію которыхъ посвящена эта книга. Постараемся пояснить это при помощи сравненія.

Сквернаго бифштекса нельзя исправить жареніемъ. Можно зажарить его лучше или хуже, получится менѣе или болѣе скверный бифштексъ, но всегда скверный. Съ другой стороны, и хорошій бифштексъ легко испортить при жареніи. Жареніе пищи аналогично тепловой обработкѣ стали. Въ сущности, педантичный поваръ могъ бы съ полнымъ правомъ назвать жареніе тепловой обработкой. Скверной стали, стали неудачнаго химическаго состава нельзя исправить тепловой обработкой; можно сдѣлать ее менѣе скверной, но совершенно исправить нельзя. Но, съ другой стороны, легко испортить и хорошую сталь.

Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ о достоинствахъ и недостаткахъ обработки можно въ сильной степени судить по простымъ внѣшнимъ признакамъ.

Для хозяйки очень важно знать методы приготовленія пищи, потому что это даетъ ей возможность руководить своей прислугой и давать соотвѣтствующія указанія. Точно также, и почти по той же причинѣ, для инженера-практика необходимо быть знакомымъ съ тепловой обработкой, тѣми признаками, которыми она сопровождается, и съ структурой металла; это необходимо не только потому, что тепловая обработка очень сильно вліяетъ на свойства металла, но въ особенности по той причинѣ, что тепловая

обработка часто производится его подчиненными, кузнецами и другими рабочими; признаки же, которыми сопровождается тепловая обработка, доступны наблюденію какъ этимъ подчиненнымъ, такъ въ еще большей степени и ему самому.

На этомъ аналогія кончается, ибо, тогда какъ пережаренный бифштексъ нельзя исправить, перегрѣтый кусокъ стали можно вновь привести почти въ его наилучшее состояніе.

Такимъ образомъ, структура стали, опредѣляемъ ли мы ее подъ микроскопомъ или на изломъ, указываетъ не только на свойства металла, но до извѣстной степени на ту обработку, въ особенности тепловую обработку, которой онъ былъ подвергнутъ, и ту тепловую обработку, которая въ дальнѣйшемъ необходима для исправленія его недостатковъ.

214) Тепловое рафинированіе [1]. — Этотъ процессъ служитъ для исправленія при помощи тепловой обработки вреда, который приноситъ стали перегрѣвъ, т. е. безпрепятственное охлажденіе съ слишкомъ высокой температуры. Вредъ этотъ выражается въ томъ, что структура стали становится грубой; грубость структуры, повидимому, и обусловливаетъ собою непосредственную причину ухудшенія свойствъ стали. Для облегченія дальнѣйшихъ разсужденій мы будемъ принимать эту причинную связь.

Прежде чѣмъ заняться изученіемъ самаго процесса, намъ слѣдуетъ познакомиться съ тѣми болѣзнями стали, къ леченію которыхъ онъ примѣняется, а также съ симптомами этихъ болѣзней. Этому будутъ посвящены слѣдующіе параграфы.

Намъ необходимо обратить вниманіе на пять слѣдующихъ положеній:

1) Структуру можно изучать или при помощи изслѣдованія полированныхъ и протравленныхъ шлифовъ подъ микроскопомъ, или при помощи изслѣдованія излома, обычно простымъ глазомъ.

2) Каждой разновидности стали или желѣза отвѣчаетъ свой нормальный типъ (или типы) излома. Типичный изломъ (обычно самый мелкій) отвѣчаетъ наилучшему состоянію металла, другой

---

[1] Авторъ называетъ приведеніе къ мелкозернистой структурѣ при помощи тепловой обработки «heat-refining», при помощи же механической обработки—«mechanical refining». Соотвѣтственныхъ терминовъ въ русскомъ языкѣ не имѣется, и потому переводчикъ пользуется терминами «тепловое рафинированіе» и «механическое рафинированіе». Прим. перев.

(обычно самый грубый) отвѣчаетъ наихудшему состоянію металла и т. д.

3) Структура любой разновидности стали или желѣза мѣняется очень сильно въ зависимости отъ предшествующей тепловой обработки.

4) Въ частности, структура стали, особенно высокоуглеродистой стали, становится грубой подъ вліяніемъ перегрѣва, и это очень понижаетъ качества металла.

5) Грубость структуры и вредъ, обусловливаемый ею, могутъ быть исправлены при помощи одного изъ процессовъ тепловой обработки, называемаго «тепловымъ рафинированіемъ» или при помощи механическаго процесса, который для краткости можно назвать «механическимъ рафинированіемъ».

215) Структура желѣза и стали.—Изученіе микроструктуры металловъ при помощи изслѣдованія подъ микроскопомъ полированныхъ и протравленныхъ или окрашенныхъ нагрѣваніемъ шлифовъ даетъ болѣе непосредственные и гораздо болѣе подробныя указанія относительно ихъ строенія, чѣмъ изслѣдованіе излома. Нѣтъ сомнѣнія, что мы быстро приближаемся къ тому времени, когда микроскопическое изслѣдованіе во многихъ случаяхъ будетъ давать возможность поставить достовѣрный діагнозъ. Уже и теперь при помощи микроскопа получено много цѣнныхъ указаній, сыгравшихъ важную роль при развитіи нашихъ свѣдѣній относительно металлографіи желѣза и стали. Однако до сихъ поръ еще эти указанія съ трудомъ поддаются толкованію вслѣдствіе ихъ отрывочнаго характера, а также вслѣдствіе ихъ многочисленности и сложности; вліяетъ еще и то, что методъ этотъ примѣняется сравнительно съ недавняго времени, и полученныя при помощи его данныя находятся между собой въ очень несовершенномъ согласіи. Въ силу всѣхъ этихъ причинъ, во многихъ случаяхъ, въ настоящее время указанія, получаемыя путемъ изученія излома, быть можетъ надо считать болѣе заслуживающими довѣрія, чѣмъ указанія, полученныя микроскопическимъ путемъ.

Когда ломаютъ кусокъ металла, изломъ слѣдуетъ поверхностямъ наименьшаго сопротивленія при существующихъ условіяхъ. На изломѣ мы и видимъ эти поверхности. Нѣкоторые сорта желѣза склонны давать изломъ одного типа, другіе иного типа. Такъ, очень волокнистый изломъ, легко по-

чающійся у сварочнаго желѣза, обладающаго большой тягучестью, получается труднѣе у не столь тягучаго желѣза и вовсе не получается у чугуна и у нормальной высокоуглеродистой стали. Очень ровный, какъ у фарфора, изломъ легко получается у высокоуглеродистой инструментальной стали и съ трудомъ, или даже вовсе не получается, у низкоуглеродистой стали или у чугуна.

Прежде чѣмъ перейти къ дальнѣйшему изученію структуры, необходимо указать на то, что одинъ и тотъ же кусокъ металла можетъ дать различный изломъ въ зависимости отъ условій,



Рис. 75. Кусокъ сварочнаго желѣза, съ котораго снятъ внѣшній слой.

при которыхъ онъ ломается. Такъ, если согнуть брусокъ изъ сварочнаго желѣза на одну сторону и сломать цѣлымъ рядомъ легкихъ ударовъ, получится волокнистый изломъ; такого рода предѣльный случай указанъ на рис. 75. Если же его предварительно согнуть на всѣ четыре стороны и затѣмъ отломить рѣзкимъ ударомъ, получится отчетливый кристаллическій изломъ. Такая разница объясняется тѣмъ, что поверхности наименьшаго сопротивленія измѣняются въ зависимости отъ условій, при которыхъ происходитъ разрывъ. Отсюда видно, что можно получить, по желанію, различный изломъ, а потому надо быть очень

осторожнымъ, дѣлая заключенія по виду излома, особенно полученнаго въ наше отсутствіе.

Наконецъ, и на это надо обратить особое вниманіе, у одного и того же образца стали и при однихъ и тѣхъ же условіяхъ, изломъ измѣняется очень сильно въ зависимости отъ тепловой и механической обработки, которой металлъ былъ предварительно подвергнутъ. Вмѣстѣ съ изломомъ измѣняются и механическія свойства металла. Такъ, если мы знаемъ, какимъ образомъ былъ сломанъ данный пробный брусокъ, или потому что мы при этомъ сами присутствовали, или на основаніи заслуживающихъ довѣрія свѣдѣній, изломъ можетъ дать очень цѣнныя указанія относительно состоянія металла, а также той тепловой и механической обработки, которыми обусловливается данное состояніе и форма излома. Вкратцѣ будетъ показано, какова зависимость между изломомъ, свойствами и обработкой.

216) Грубозернистый взломъ указываетъ на грубозернистую структуру.—Поверхностями наименьшаго сопротивленія, которыя мы видимъ на изломѣ, являются обыкновенно или поверхности кристалловъ, или поверхности, отвѣчающія плоскостямъ спайности; а такъ какъ значительная поверхность, отвѣчающая плоскости спайности, можетъ возникнуть только при значительной величинѣ кристалла, то въ качествѣ рабочей гипотезы мы и принимаемъ, что грубый изломъ указываетъ на грубую структуру, т. е. на существованіе значительной величины кристалловъ. Обратное заключеніе внушаетъ меньше довѣрія, ибо мелкій изломъ можетъ вызываться не малымъ размѣромъ кристалловъ, а небольшими поверхностями, отвѣчающими плоскостямъ спайности. Большіе кристаллы могутъ обладать плохо выраженной спайностью, такъ что разрывъ вмѣсто того, чтобы идти на большомъ протяженіи вдоль по данной плоскости спайности, образуя большія поверхности на изломѣ, т. е. вызывая грубый изломъ, можетъ пойти только небольшое разстояніе по данной плоскости спайности, затѣмъ перескочить на другую, результатомъ чего на изломѣ будетъ видно большое число очень незначительныхъ по величинѣ плоскостей спайности, т. е. получится мелкій изломъ.

Но, насколько наши свѣдѣнія относительно желѣза и стали позволяютъ судить, обыкновенно грубому излому отвѣчаетъ грубая кристаллическая структура, мелкому излому—мелкая струк-

тура. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ данныя, получаемыя изученіемъ излома, приходится дополнять при помощи микроскопическихъ изслѣдованій.

Однимъ словомъ, говоря о грубости зерна стали на изломѣ, мы подразумѣваемъ величину поверхностей, которыя мы видимъ. Величина же послѣднихъ, повидимому, пропорціональна величинѣ самихъ кристалловъ, или размѣрамъ сѣтки между кристаллами, изъ которыхъ состоитъ металлъ.

Для упрощенія, въ дальнѣйшемъ изложеніи мы будемъ подразумѣвать подъ «величиною зерна» какъ степень грубости излома, такъ и степень грубости микроструктуры, опредѣленную на шлифѣ подъ микроскопомъ; при этомъ мы будемъ принимать, что грубость структуры пропорціональна грубости излома и наоборотъ. Далѣе, мы будемъ допускать, что состояніе данной разновидности стали тѣмъ лучше, чѣмъ мельче ея структура.

Это допущеніе и придаетъ изслѣдованію интересъ и большое значеніе для инженера-практика. Мы увидимъ ниже, что это допущеніе, будучи въ общемъ справедливо, въ нѣкоторыхъ случаяхъ должно быть нѣсколько модифицировано. Напримѣръ, въ общемъ можно считать, что сталь для очень разнообразныхъ примѣненій тѣмъ лучше, чѣмъ мельче ея зерно, однако для нѣкоторыхъ спеціальныхъ условій примѣненія, качества, сопровождающія самое мелкое зерно, которое только можетъ быть достигнуто, могутъ быть менѣе желательны, чѣмъ тѣ, которыя сопровождаютъ нѣсколько болѣе грубое зерно.

217) Общіе законы, касающіеся излома и температуры. Теперь мы формулируемъ нѣсколько законовъ, представляющихъ собой сводку нашихъ свѣдѣній по этому предмету. Необходимо имѣть въ виду, что эти законы представляютъ собою только попытку дать въ сжатой формѣ результаты нашихъ наблюденій, и что ни одинъ изъ этихъ законовъ, повидимому, не окажется совершенно точнымъ; большинство изъ нихъ должно будетъ въ будущемъ подвергнуться измѣненію. Несмотря на это, мы полагаемъ, что временно они могутъ быть полезны, и что при ихъ помощи окажется не только легче примѣнять современныя отрывочныя знанія, но что они также помогутъ расширенію послѣднихъ и устраненію многихъ ошибокъ.

Законы, касающіеся области IV, рис. 68; строеніе аустенита. Повидимому, для даннаго рода стали всякой данной температурѣ

въ области IV соотвѣтствуетъ свой нормальный діаметръ зерна (см. конецъ § 217), и что послѣдній увеличивается съ повышеніемъ температуры (рис. 76а) [1]).

Положимъ, что

D^n = нормальному діаметру зерна при данной температурѣ T въ области IV, для данной стали.

Зерно, въ дѣйствительности существующее при данной температурѣ въ этой области, можетъ имѣть размѣръ D^n, но можетъ и не имѣть. Обозначимъ дѣйствительный размѣръ зерна аустенита черезъ D^a въ отличіе отъ D^n, или

D^a = дѣйствительному діаметру зерна даннаго образца стали при данной температурѣ въ области IV.

Повидимому, нормальный размѣръ зерна увеличивается съ повышеніемъ температуры въ области IV; это можно выразить слѣдующимъ образомъ:

[1] . . . . $D^n : D^{n\prime} = T : T'$.

Еще не установлено, строго ли пропорціоналенъ діаметръ зерна температурѣ, какъ это гласитъ законъ [1], или онъ пропорціоналенъ нѣкоторой функціи температуры. Линія JDG на рис. 76 представляетъ собой попытку выразить этотъ законъ.

Профессоръ Sauveur и авторъ получили для одного образца стали [2]) выраженіе $T^{max.} = 680 + 281{,}250 \cdot a$, гдѣ $T^{max.}$ равно до-

---

[1]) Повидимому, точнѣе говорить, «что при данной продолжительности нагрѣванія и для даннаго сорта стали всякой данной температурѣ въ области IV соотвѣтствуетъ свой нормальный діаметръ зерна». Въ началѣ нагрѣванія стали при данной температурѣ въ области IV, зерно растетъ очень быстро, но затѣмъ скорость роста постепенно падаетъ, и кажется, будто бы величина зерна достигаетъ извѣстнаго предѣла. Сомнительно, однако, чтобы существовалъ подобный предѣлъ. Напримѣръ, хотя, повидимому, величина зерна, достигаемая нагрѣваніемъ въ теченіе 30 минутъ при 1100° одинакова съ той, которая получилась бы, если бы нагрѣваніе продолжалось 35 или даже 40 минутъ, однако весьма вѣроятно, что при гораздо болѣе долгомъ нагрѣваніи, положимъ въ теченіе двухъ часовъ, можно было бы констатировать значительный дальнѣйшій ростъ зерна. Такимъ образомъ, величина зерна, достигнутая двухчасовымъ нагрѣваніемъ при 1050° могла бы оказаться на самомъ дѣлѣ больше, чѣмъ достигнутая 30-ти-минутнымъ нагрѣваніемъ при 1100°. Однако болѣе простое выраженіе этого закона, данное въ текстѣ, повидимому, представляетъ собою достаточное приближеніе для большинства техническихъ цѣлей.

[2]) Составъ стали былъ: углерода 1,10%, кремнія 0,02%, марганца 0,41%. «Eng. and Min. Journ.», LX, стр. 537, дек. 7, 1895.

стигнутой температурѣ, a — дѣйствительной площади зерна въ кв. миллиметрахъ при линейномъ увеличеніи въ 250 разъ. Это указываетъ на то, что нормальная величина зерна строго пропорціональна температурѣ. Согласно этому, нижняя часть этой линіи и была нанесена прямой. Кривая же, при помощи которой Черновъ представилъ зависимость между величиной зерна и температурой, отличается отъ приведенной здѣсь кривой JDG тѣмъ, что она на всемъ своемъ протяженіи кверху отъ J загибается вправо. Такъ какъ изслѣдованія Чернова относятся къ болѣе высокимъ температурамъ, чѣмъ наши, то это и наводитъ на простое объясненіе, а именно, что, нормальная величина зерна при относительно низкихъ температурахъ, или до границы Aa области II пропорціональна температурѣ, при болѣе же высокихъ температурахъ величина зерна увеличивается скорѣе, чѣмъ повышается температура. Имѣя это въ виду, я и изобразилъ верхнюю часть этой линіи изогнутой.

Для упрощенія, однако, мы можемъ принимать законъ [1] въ той формѣ, въ которой онъ выше данъ, несмотря на то, что онъ требуетъ, чтобы линія JDG была прямой на всемъ своемъ протяженіи. Такого рода незначительное несогласіе не должно насъ смущать, если мы припомнимъ, что какъ линія JDG, такъ и выраженіе закона [1] представляютъ собой только первое приближеніе. Если бы мы дали выраженіе точно отвѣчающее кривой, такъ, какъ она здѣсь представлена, это могло бы повести только къ ошибочному представленію о гораздо большей степени точности нашихъ свѣдѣній, чѣмъ на самомъ дѣлѣ.

Второй законъ, касающійся величины зерна. При любой данной температурѣ въ области IV зерна растутъ до нормальнаго размѣра, если размѣръ существующихъ зеренъ меньше нормальнаго для данной температуры; или

[2] . . . . . если $D^a < D^n$, D^a растетъ до D^n.

Ростъ этотъ отнюдь не происходитъ мгновенно, наоборотъ — онъ можетъ продолжаться много часовъ.

Вѣроятно, вначалѣ ростъ идетъ очень быстро и затѣмъ становится все медленнѣе и медленнѣе, по мѣрѣ приближенія зеренъ къ нормальному размѣру.

Третій законъ, касающійся величины зерна. Если существующее зерно больше нормальнаго для данной температуры въ

области IV, то оно уже не приходитъ вновь къ нормальной величинѣ; или

[3] . . . если $D^a > D^н$, то D^a не уменьшается до $D^н$.

Поясимъ это на примѣрѣ. Нагрѣемъ кусокъ стали, скажемъ, до температуры *C* (рис. 76); положимъ, что въ моментъ достиженія этой температуры величина зерна равна *H*; тогда, если

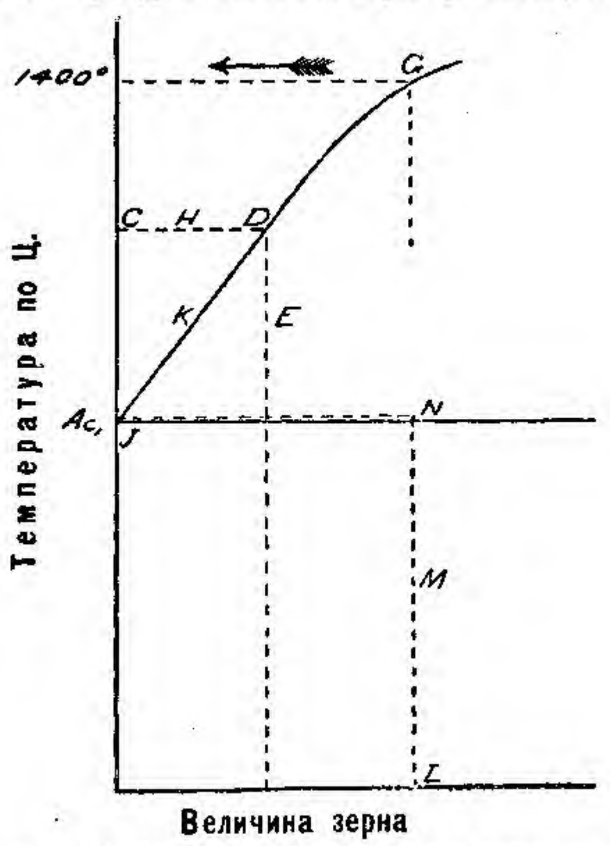


Рис. 76. Законъ [I]. Нормальная величина зерна эвтектоидной стали въ области IV. Первое приближеніе.

поддерживать постоянную температуру *C*, зерно будетъ постепенно увеличиваться до тѣхъ поръ, пока оно не достигнетъ величины *D*, соотвѣтствующей температурѣ *C*. Послѣ того, какъ зерно достигнетъ величины *D*, охладимъ сталь до температуры *E*; при этомъ величина зерна останется равной *D*, а слѣдовательно она будетъ находиться далеко направо отъ *K*, представляющаго нормальную величину зерна при температурѣ *E*.

Четвертый законъ, касающійся величины зерна. Положимъ, что

$T^{max.}$ = наивысшей температурѣ, достигнутой при послѣднемъ пребываніи въ области IV,

и что измѣненія температуры были настолько медленны, что зерно имѣло возможность приблизительно достигнуть величины нормальной для $T^{max.}$; изъ законовъ [1], [2] и [3] тогда слѣдуетъ, что существующая величина зерна должна быть пропорціональна $T^{max.}$; отсюда слѣдуетъ законъ [4],

$$[4] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad D^a : D^{a\prime} = T^{max.} : T^{max.\prime}.$$

Таково выраженіе въ общемъ видѣ закона, обусловливающаго величину зеренъ въ закаленной стали; мы можемъ принять, что величина зерна въ закаленной стали равна величинѣ зерна аустенита при наивысшей достигнутой температурѣ въ области IV.

Поскольку это нужно для нашихъ настоящихъ цѣлей, вполнѣ достаточно было бы опредѣленія, что $T^{max.}$ есть наивысшая достигнутая температура, не прибавляя «при послѣднемъ пребываніи въ области IV»; вскорѣ, однако, мы увидимъ, почему нами было введено данное ограниченіе.

Законы, относящіеся до области VI и, по всей вѣроятности, до лѣвой части области VIII.—Принимая во вниманіе, что составляющими въ этой области являются перлитъ съ избыткомъ феррита или цементита, положимъ, что

D^n = діаметру зерна въ этой области или діаметру перлита.

При переходѣ стали во время охлажденія изъ области IV въ область VI, повидимому, величина зеренъ, возникающихъ въ области VI, по крайней мѣрѣ приблизительно, пропорціональна величинѣ зеренъ, существовавшихъ въ области IV. Это составляетъ законъ [5],

$$[5] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad D^n : D^{n\prime} = D^a : D^{a\prime}.$$

Существуютъ, однако, причины полагать, что величина зерна, существующаго въ области IV, одинакова съ величиной зерна, возникающаго при переходѣ въ область VI; короче говоря (законъ [6])

$$[6] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad D^n = D^a.$$

Иными словами, повидимому, величина зерна стали не измѣняется при охлажденіи ниже критическаго интервала.

Насколько можно судить, въ областяхъ VI и VIII величина зерна не зависитъ отъ температуры; сталь въ этихъ областяхъ имѣетъ величину зерна, пріобрѣтенную въ области IV.

Седьмой законъ, касающійся величины зерна.—Изъ законовъ [4] и [5] слѣдуетъ, что если сталь подвергалась нагрѣванію при наивысшей температурѣ, достигнутой въ области IV, достаточно продолжительное время для того, чтобы зерно достигло величины, соотвѣтствующей этой температурѣ, тогда величина зерна,

Нагрѣта до

1339° 1212° 966°

и затѣмъ медленно охлаждена.

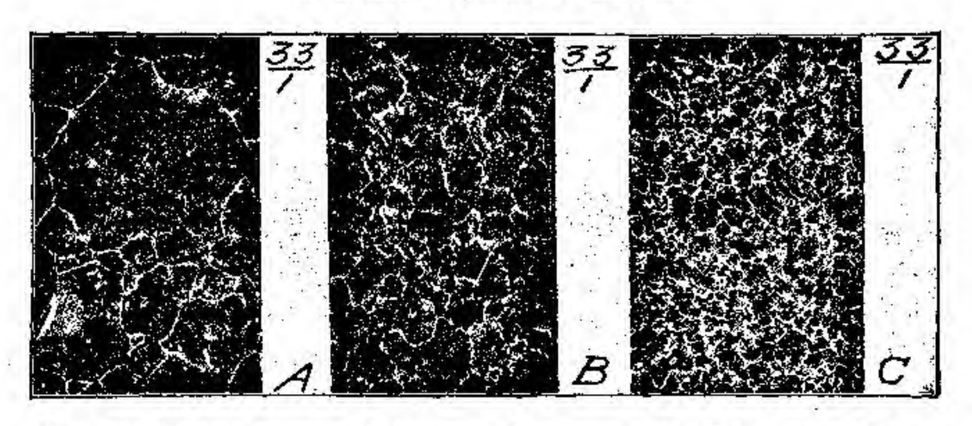


Рис. 76*a*. Вліяніе наивысшей достигнутой температуры ($T^{max.}$) на величину зерна медленно охлажденной стали.

Сталь, содержащая 0,50% углерода. Wm. Campbell, лабораторія автора.

даже послѣ медленнаго охлажденія, будетъ пропорціональна наивысшей температурѣ; это составляетъ законъ [7],

[7] . . . . $D^n : D^{n\prime} = T^{max.} : T^{max.\prime}$.

Очевидно, этотъ законъ долженъ быть справедливъ даже и въ томъ случаѣ, если не всѣ вышеуказанныя условія соблюдены. Такъ, положимъ, что мы нагрѣемъ два одинаковыхъ куска стали до различныхъ температуръ въ области IV съ приблизительно одинаковой скоростью; тогда, даже если нагрѣваніе при наивысшей температурѣ и не будетъ достаточно продолжительнымъ для того, чтобы величина зеренъ каждаго куска достигла величины, соотвѣтствующей этой температурѣ, все же она приблизится къ предѣльной величинѣ, къ которой она стремится.

Величина зерна болѣе высоко нагрѣтаго куска будетъ соотвѣтственно больше, чѣмъ величина зерна менѣе высоко нагрѣтаго куска, потому что величина зерна перваго стремится къ большему предѣлу, чѣмъ второго. Относительно этихъ кусковъ, слѣдовательно, можно съ полнымъ правомъ сказать, что въ общемъ величина зерна пропорціональна наивысшей температурѣ, достигнутой въ области IV (законъ [7]).

Рис. 76а указываетъ, насколько возрастаетъ величина зерна медленно охлажденной стали, или D^{r}, съ повышеніемъ температуры, до которой сталь была нагрѣта въ области IV.

Слѣдуетъ обратить вниманіе на грубую сѣтку стали, нагрѣтой до 1330°, болѣе мелкую сѣтку стали, нагрѣтой только до 1212°, и на еще болѣе мелкую сѣтку стали, нагрѣтой до 966°.

Чрезвычайно важнымъ выводомъ изъ этого закона является то, что на основаніи вида излома или микроструктуры шлифа можно судить, была ли сталь безъ надобности нагрѣта до слишкомъ высокой температуры или нѣтъ. Опытный глазъ можетъ съ удивительной точностью опредѣлить температуру, которая была достигнута въ области IV, понятно, не въ градусахъ Цельсія, но относительно. Вѣроятно, пройдетъ немного лѣтъ, и мы будемъ въ состояніи формулировать эти законы съ извѣстной точностью, такъ что даже сравнительно неопытный человѣкъ будетъ имѣть возможность опредѣлить на основаніи величины зерна, видимой на шлифѣ, до какой температуры была нагрѣта сталь въ области IV, если извѣстенъ ея составъ и если условія даннаго случая позволяютъ судить о томъ, какова была скорость нагрѣванія. Относительно условій нагрѣванія часто можно судить, зная устройство печи для нагрѣванія, размѣръ куска стали, подвергавшагося обработкѣ, и т. д.

218) Восьмой законъ. Тепловое рафинированіе. — Этотъ вопросъ представляетъ, пожалуй, наибольшую важность для инженера-практика. Мы можемъ разсмотрѣть два ряда условій, 1) касающихся стали съ приблизительно 0,90% углерода, т. е. эвтектоидной, и 2) касающихся стали съ меньшимъ содержаніемъ углерода, т. е. гипо-эвтектоидной.

Тепловое рафинированіе эвтектоидной стали. — Вызовемъ у куска эвтектоидной стали грубозернистое строеніе путемъ нагрѣванія при высокой температурѣ въ области IV, затѣмъ охладимъ ее до температуры, лежащей въ предѣлахъ области VI

(безразлично до комнатной температуры, или до нѣкоторой болѣе высокой температуры въ области VI), и затѣмъ нагрѣемъ его вновь до температуры, лежащей въ области IV. Во время этого перехода черезъ узкій интервалъ превращенія (представленный на рис. 68 въ видѣ точки S) грубое зерно, D^a, распадается и возникаетъ болѣе мелкое зерно. Затѣмъ это новое зерно достигаетъ величины, пропорціональной температурѣ, достигнутой во время вторичнаго пребыванія въ области IV. Для поясненія обратимся вновь къ рис. 76. Положимъ, что кусокъ стали былъ нагрѣтъ до 1400° и пріобрѣлъ при этомъ грубое зерно, величина котораго, G, соотвѣтствуетъ указанной температурѣ 1400°; положимъ, далѣе, что этотъ кусокъ стали былъ вполнѣ охлажденъ.

Величину зерна охлажденной стали можно представить черезъ L. Предположимъ, теперь, что эта сталь вновь подвергается нагрѣванію, какъ это представлено пунктирной линіей LMN. При этомъ, повидимому, не происходитъ никакого измѣненія въ величинѣ зерна до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнута температура Ac, т. е. до тѣхъ поръ, пока сталь не вступитъ въ область IV. Какъ только это происходитъ, грубое зерно, повидимому, совершенно исчезаетъ и возникаетъ новое, чрезвычайно мелкое зерно. Величина зерна, насколько можно судить, слѣдуетъ линіи $LMNJ$. Это явленіе можно назвать «тепловымъ рафинированіемъ».

Отсюда слѣдуетъ законъ 8, теплового рафинированія, гласящій, что *если поднять температуру эвтектической стали выше точки превращенія* Ac_{1-2-3}, *первоначальное зерно исчезаетъ и замѣщается чрезвычайно мелкимъ зерномъ.*

Зерно, возникающее при нагрѣваніи выше Ac_{1-2-3}, настолько мелко, что часто говорятъ, что сталь становится аморфной. Это даетъ понятіе о чрезвычайной мелкости зерна, но, конечно, правильнѣе говорить, что сталь обладаетъ такимъ же мелкимъ зерномъ, какъ фарфоръ, чѣмъ называть ее аморфной.

При дальнѣйшемъ повышеніи температуры зерно начинаетъ увеличиваться, слѣдуя линіи JDG, совершенно такъ же, какъ и во время предыдущаго пребыванія въ области IV. Послѣ охлажденія стали, ея величина зерна D^a будетъ отвѣчать наивысшей температурѣ, достигнутой во время этого послѣдняго пребыванія въ области IV. Такимъ образомъ, только послѣднее пребываніе въ области IV опредѣляетъ величину зерна, какъ D^a,

такъ и D^n, и поэтому-то T^{max} и было дано опредѣленіе наивысшей температуры, достигнутой во время послѣдняго пребыванія въ области IV. Очевидно, законъ [7] только и имѣетъ значеніе при такомъ опредѣленіи T^{max}.

Необходимо ясно себѣ представлять, что рафинированіе есть явленіе, сопровождающее собой повышеніе температуры выше Ac_{1-2-3}, но не наступающее при охлажденіи ниже Ar_{1-2-3}. Иными словами, перегрѣтая, пріобрѣвшая грубое зерно, сталь рафинируется, переходя при нагрѣваніи изъ области VI или VIII въ область IV, но не рафинируется, переходя при охлажденіи изъ области IV въ области VI или VII.

Гипо-эвтектоидная сталь.—Измѣненія, составляющія явленіе теплового рафинированія, которыя въ случаѣ эвтектоидной стали происходятъ вмѣстѣ въ тройной критической точкѣ Ac_{1-2-3}, въ случаѣ гипо-эвтектоидной, а также, вѣроятно, и гипер-эвтектоидной стали обнимаютъ собой весь интервалъ превращенія, области V и VIII.

Повидимому, тепловое рафинированіе въ данномъ случаѣ состоитъ въ томъ, что первоначальная грубая структура постепенно ослабѣваетъ по мѣрѣ повышенія температуры отъ Ac_1 до Ac_3, т. е. по мѣрѣ повышенія температуры въ области V, и наконецъ исчезаетъ, когда температура вступаетъ въ область IV. Во время этого ослабѣванія происходитъ новое наростаніе величины зерна, начинаясь при Ac_1 и продолжаясь на всемъ протяженіи области V и IV. Если Ac_3 много выше Ac_1, какъ въ случаѣ очень низкоуглеродистой стали, тогда къ времени исчезновенія стараго зерна при переходѣ черезъ Ac_3, новое зерно достигаетъ значительной величины. Этимъ и обусловливается, что явленіе рафинированія не столь рѣзко выражено, какъ въ случаѣ эвтектоидной стали; ибо первоначальное грубое зерно не въ состояніи исчезнуть безъ того, чтобы не возникло новое зерно значительной величины. Съ другой стороны, если Ac_3 только немногимъ выше Ac_1, т. е. если область V незначительна (какъ въ случаѣ стали, содержаніе углерода въ которой немногимъ меньше, чѣмъ въ эвтектоидной), тогда исчезновеніе стараго грубаго зерна при Ac_3 отдѣляется такимъ незначительнымъ температурнымъ интерваломъ отъ температуры, при которой начинается новое наростаніе зерна, что это новое зерно достигаетъ только незначительной величины. Этимъ и обусло-

вливается, что тепловое рафинированіе такой стали происходитъ почти настолько же совершенно, какъ и эвтектоидной стали.

Для лучшаго пониманія всѣхъ этихъ явленій, припомнимъ что происходитъ въ то время, какъ температура пересѣкаетъ область V (рис. 68). Когда, во время охлажденія, начавшагося въ области IV, температура пересѣкаетъ *GHS* и вступаетъ въ область V, избытокъ желѣза сверхъ эвтектоидной пропорціи, 99,1% желѣза и 0,90% углерода, начинаетъ выдѣляться въ аустенитѣ, во многихъ случаяхъ образуя сѣтку, ширина петель которой зависитъ отъ температуры, достигнутой въ области IV. Другими словами, избытокъ феррита, выдѣляющійся при пониженіи температуры ниже Ar_3, обычно образуетъ сѣтку, которая можетъ быть непрерывной или только зачаточной. Но независимо отъ того, непрерывна ли она или только зачаточна, ея грубость, т. е. ширина ея петель, служитъ мѣрою величины зеренъ. Широкія петли соотвѣтствуютъ грубому зерну, такъ какъ самую петлю и то, что въ ней заключено, можно разсматривать, какъ одно зерно. Величина зеренъ тѣмъ больше, чѣмъ выше T^{max}.

По мѣрѣ пониженія температуры въ области V, выдѣленіе продолжается, такъ что ферритовая сѣтка между зернами остающагося аустенита постепенно становится все толще и болѣе ясно выраженной. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ Ar_1, нижней границы области V; къ этому времени зерна аустенита успѣваютъ выдѣлить въ окружающую ферритовую сѣтку весь избытокъ желѣза сверхъ пропорціи перлита, т. е. весь избытокъ желѣза сверхъ пропорціи 99,1% желѣза: 0,90% углерода, выражающей составъ гарденита. Такимъ образомъ, въ результатѣ получается сѣтка феррита максимальной толщины, окружающая зерна гарденита, т. е. аустенита эвтектоиднаго состава. Когда температура понижается до Ar_1, т. е. когда наступаетъ рекалесценція, зерна аустенита переходятъ въ перлитъ, повидимому, не оказывая при этомъ вліянія на окружающую сѣтку феррита. Для упрощенія я не останавливаюсь здѣсь на постепенномъ переходѣ аустенита черезъ стадіи мартенсита, сорбита и тростита въ перлитъ. Эти превращенія играютъ чрезвычайно важную роль, но въ данномъ случаѣ ихъ можно оставить безъ вниманія.

Указанная структута не измѣняется при дальнѣйшемъ охлажденіи въ области VI; не измѣняется она также и при послѣ-

дующемъ нагрѣваніи до тѣхъ поръ, пока не будетъ вновь достигнута область V. При повышеніи температуры въ области V всѣ сейчасъ указанныя превращенія идутъ въ обратномъ порядкѣ. А именно, когда температура минуетъ Ar_1, перлитъ, заключенный въ петляхъ сѣтки, переходитъ вновь въ аустенитъ; по мѣрѣ дальнѣйшаго повышенія температуры ферритовая сѣтка постепенно поглощается зернами аустенита и становится все тоньше, при чемъ, однако, ширина петель не измѣняется. Нагрѣвая куски, вырѣзанные изъ болванки гипо-эвтектоидной стали (углерода 0,56%, кремнія 0,14%, марганца 0,18%, фосфора 0,02%, сѣры 0,02%), я могъ наблюдать, сравнивая между собой различные куски, нагрѣтые до различной температуры въ области V, какъ постепенно исчезаетъ ферритовая сѣтка; это явленіе очень похоже на таяніе иголъ льда въ теплой водѣ. Когда достигается верхняя граница области V, Ac_3, сѣтка совершенно исчезаетъ; поглощеніе ея аустенитомъ происходитъ нацѣло.

Это постепенное поглощеніе ферритовой сѣтки и вызываетъ ослабленіе первоначальной грубой структуры, возникшей во время предыдущаго нагрѣванія до высокой температуры въ области IV. Причиной, почему первоначальная структура, несмотря на то, что она ослабѣваетъ и становится менѣе рѣзко выраженной, по прежнему сохраняетъ свою степень грубости, служитъ то обстоятельство, что поглощеніе сѣтки не сопровождается измѣненіемъ величины зеренъ, которыя эта сѣтка окружаетъ. Первоначальная структура все менѣе и менѣе служитъ факторомъ, опредѣляющимъ собою путь, по которому пойдетъ изломъ; но все-таки до тѣхъ поръ, пока изломъ будетъ идти по прежнему пути, поверхность его будетъ одинаково грубо-зерниста.

Но въ то время, какъ первоначальная структура нарушается, возникаетъ новая, и какъ бы независимая отъ старой, структура. Ибо, согласно закону [1], $D'': D''' = T : T'$, изъ зеренъ аустенита, заключенныхъ въ старой сѣткѣ феррита, образуются новыя зерна. Эти зерна представляютъ собой зерна аустенита, не окруженныя новой сѣткой феррита; послѣдняя можетъ возникнуть вокругъ новыхъ зеренъ только при слѣдующихъ условіяхъ. Если мы сперва повысимъ до извѣстной степени температуру въ области V и затѣмъ нѣсколько понизимъ, оставаясь въ той же области, часть феррита, раствореннаго въ аустенитѣ,

выдѣлится и образуетъ новую сѣтку, которая охватитъ эти новыя зерна аустенита.

Въ такомъ случаѣ, въ совершенно охлажденной стали можно обнаружить двойную сѣтку, состоящую 1) изъ остатковъ прежней сѣтки съ широкими петлями, болѣе или менѣе изгладившейся, въ зависимости отъ того, была ли температура поднята на много выше Ac_1 или нѣтъ; и 2) изъ новой, болѣе мелкой ферритовой сѣтки, образовавшейся внутри петель старой сѣтки во время указаннаго пониженія температуры въ области V.

Такимъ образомъ, гипо-эвтектоидная, съ очень малымъ содержаніемъ углерода, сталь не можетъ быть вполнѣ приведена къ мелко-зернистой структурѣ при помощи теплового рафинированія. Ибо, если даже въ области V и будетъ достигнута достаточная температура для того, чтобы исчезла старая грубая сѣтка, новая ферритовая сѣтка достигнетъ при охлажденіи значительной величины, вслѣдствіе большого температурнаго интервала между Ac_1 и предѣломъ подъема температуры.

Изслѣдованія K. F. Göransson'a, произведенныя въ моей лабораторіи, доказываютъ, что въ общихъ чертахъ это справедливо также и по отношенію къ гипер-эвтектоидной стали [1]).

219) Установленіе температуры теплового рафинированія.—Въ случаѣ стали, содержащей отъ 0,40% до 0,90% углерода, верхней критической точкой Ac_{2-3}, при которой заканчивается рафинированіе, является точка, въ которой исчезаютъ магнитныя свойства, повидимому, вслѣдствіе превращенія обладающаго магнитными свойства альфа-феррита въ не обладающій магнитными свойствами гамма-ферритъ аустенита. Такимъ образомъ, температурой рафинированія въ смыслѣ температуры, требуемой для окончанія рафинированія, служитъ температура, при которой исчезаютъ магнитныя свойства. Температуру эту очень легко установить, путемъ опредѣленія магнитныхъ свойствъ стали. Для этого можетъ служить закаленный и намагниченный кусокъ проволоки изъ высокоуглеродистой стали, подвѣшенный въ небольшомъ деревянномъ цилиндрѣ. Желая установить температуру рафинированія, сталь медленно нагрѣваютъ и время отъ времени подносятъ къ упомянутой намагниченной проволокѣ,

---

[1]) «The Effect of Reheating upon the Coarse Structure of Over-Heated Steel», Trans. Am. Inst. Mining Engineers, должно появиться.

для того, чтобы убѣдиться, обладаетъ ли еще сталь магнитными свойствами. Когда приходится имѣть дѣло съ большимъ стальнымъ предметомъ, вмѣстѣ съ нимъ нагрѣваютъ маленькій кусокъ изъ той же стали, который и служитъ для испытанія магнитныхъ свойствъ.

220) Хрупкость по изслѣдованіямъ Stead'a.—Тотъ фактъ, что отношеніе между количествомъ феррита и перлита въ очень низкоуглеродистой стали сильно разнится отъ отношенія въ высокоуглеродистой стали, конечно, вызываетъ нѣсколько различныя явленія при ихъ тепловой обработкѣ. Одно изъ такихъ очень важныхъ явленій было обнаружено Stead'омъ[1]).

Stead нашелъ, что при очень низкомъ содержаніи углерода, положимъ отъ 0,025 до 0,12%, зерно постепенно увеличивается по мѣрѣ повышенія температуры, начиная, приблизительно, съ 500° Ц.; при Ac_1, скажемъ, около 700° не только не наступаетъ явленія тепловаго рафинированія, но зерно не перестаетъ расти, и это продолжается, повидимому, до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ Ac_2. Начиная съ этой точки, величина зерна болѣе не измѣняется до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ приблизительно 900° Ц. (Ac_3); въ этой точкѣ грубое зерно распадается и наступаетъ явленіе рафинированія.

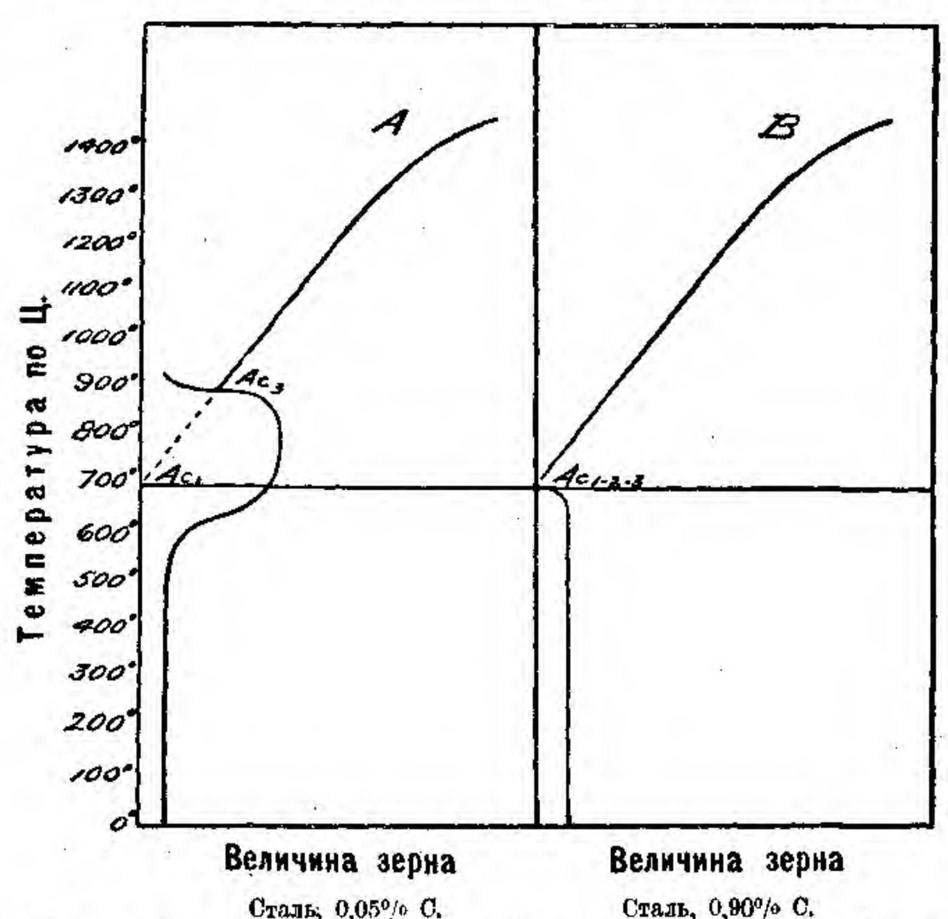
Результаты Stead'a представлены графически на рис. 77 (*A*); для сравненія, рядомъ (*B*) въ общихъ чертахъ представлены соотвѣтствующія явленія, происходящія въ эвтектоидной стали. Пунктирная линія въ лѣвой части *A*, рис. 77, должна указывать на то, что зерно аустенита при температурахъ выше Ac_1, начинаетъ увеличиваться съ момента своего возникновенія, т. е. какъ только температура повысится выше Ac_1.

У обоихъ родовъ стали явленія рафинированія наступаютъ по достиженіи Ac_3; у низкоуглеродистой стали, кромѣ того, наблюдается еще ростъ зерна и увеличеніе хрупкости при медленномъ подъемѣ температуры въ верхней части области VI. Нельзя не обратить вниманія на тотъ, въ сущности вполнѣ естественный, фактъ, что хрупкость, какъ возникающая у стали съ значительнымъ содержаніемъ углерода подъ вліяніемъ перегрѣва, такъ и возникающая у низкоуглеродистой стали подъ вліяніемъ долгаго нагрѣванія при 500°—700°, можетъ быть уничтожена путемъ

---

[1]) Journal Iron and Steel Institute, 1898, I, стр. 145 и 1898, II, стр. 137.

рафинированія металла, наступающаго при нагрѣваніи его выше Ac_3; ибо, какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ сущность явленія, происходящаго при этомъ, состоитъ въ окончательномъ поглощеніи феррита аустенитомъ. По мѣрѣ того, какъ при нагрѣваніи температура приближается къ Ac_3, количество



Сталь, 0,05% С. Сталь, 0,90% С.

Рис. 77. Предполагаемое соотношеніе между температурой и величиной зерна стали. Первое приближеніе.

свободнаго феррита становится постепенно меньше, вслѣдствіе поглощенія его аустенитомъ; но въ то же время географическое положеніе феррита, если можно такъ выразиться, повидимому, не измѣняется. Благодаря этому величина зерна, какъ было уже указано, остается безъ измѣненія.

Поглощеніе феррита заканчивается только по минованіи температуры Ac_3; вмѣстѣ же съ исчезновеніемъ феррита исчезаетъ

въ сильной степени, а иногда и совсѣмъ, грубая зернистость и хрупкость металла, которыя вызывались, въ свою очередь, грубымъ строеніемъ феррита.

Какъ и слѣдовало ожидать, въ этомъ отношеніи, разницы между этими двумя видами стали въ общемъ не существуетъ. Но и то, что явленія, происходящія въ нихъ, при медленномъ нагрѣваніи въ верхней части области VI, различны, нисколько не должно насъ удивлять. Ибо, медленно охлажденная, т. е. находящаяся въ состояніи перлита, сталь, содержащая, скажемъ, отъ 0,45 до 0,85% углерода, состоитъ изъ основной массы перлита, пронизанной тонкой сѣткой феррита. Если же содержаніе углерода очень незначительно, скажемъ, отъ 0,025 до 0,12%, какъ въ стали, которую изслѣдовалъ Stead, тогда перлитъ, напротивъ, вмѣсто того, чтобы образовывать главную или по крайней очень значительную часть массы, является въ видѣ небольшихъ разбросанныхъ частичекъ, заключенныхъ въ большомъ избыткѣ феррита. Вслѣдствіе этого, увеличеніе грубости зерна и хрупкости у низкоуглеродистой стали въ верхней части области VI, очевидно, приходится скорѣе относить на счетъ увеличенія грубости зерна феррита, чѣмъ на счетъ какихъ либо измѣненій въ перлитѣ.

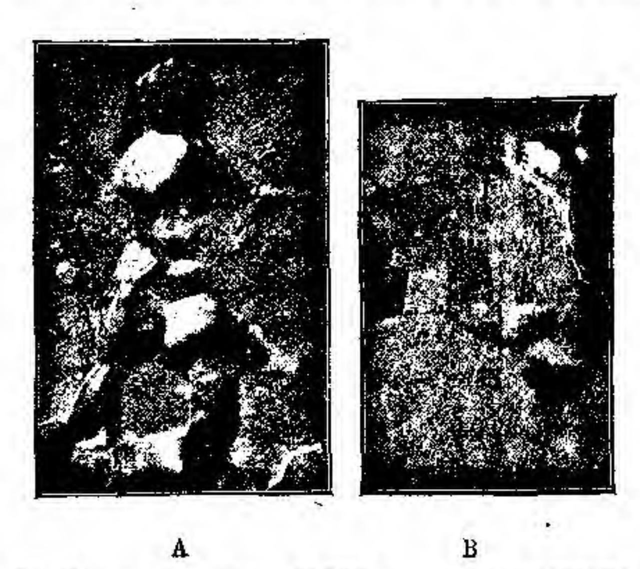
Относительно стали съ бо̀льшимъ содержаніемъ углерода вопросъ еще остается открытымъ. Но нисколько неудивительно, если хрупкость такого рода стали при медленномъ нагрѣваніи въ верхней части области VI не будетъ увеличиваться или будетъ увеличиваться только крайне незначительно. Ибо, разумѣется, въ такой стали главную роль должна играть величина зеренъ перлита, заключенныхъ въ ферритовой сѣткѣ, а не величина зеренъ феррита, изъ которыхъ эта сѣтка состоитъ.

221) Пережогъ.—До сихъ поръ мы разсматривали только вліяніе незначительнаго перегрѣва. Чрезвычайно сильный перегрѣвъ настолько ослабляетъ связь между зернами, что выдѣляющійся изъ металла газъ ихъ нѣсколько раздвигаетъ. Вѣроятно, этотъ газъ состоитъ, по крайней мѣрѣ отчасти, изъ окиси углерода, образующейся изъ кислорода воздуха, проникающаго въ сталь и соединяющагося съ углеродомъ. Могутъ оказывать вліяніе также и растворенные газы, водородъ и азотъ, выдѣляющіеся изъ раствора при повышеніи температуры.

О такой стали говорятъ, что она «пережжена», въ отличіе отъ стали, которая только перегрѣта. Въ дальнѣйшемъ мы будемъ

различать пережогъ отъ перегрѣва, и подъ пережогомъ будемъ понимать механическое разъединеніе зеренъ подъ вліяніемъ чрезвычайно сильнаго перегрѣва.

Другимъ отличительнымъ признакомъ пережога служитъ большая толщина петель ферритовой сѣтки, которая образуется при охлажденіи въ области V сильно перегрѣтой, а слѣдовательно и очень грубо зернистой стали. Пережженую сталь можно узнать по ея хрупкости какъ въ холодномъ, такъ и въ горячемъ состояніи, по грубому, блестящему излому и по слою окиси, который часто можно видѣть на изломѣ. Очень возможно, что



A B

Рис 78. Пережженая сталь (0,50% углерода) увеличеніе 33.
W. Campbell, Ph. D., лабораторія автора.

дѣйствіе, оказываемое пережогомъ, до извѣстной степени можетъ быть объяснено грубо-зернистою структурой ферритовой сѣтки, но нельзя себѣ представить, чтобы только одно это обстоятельство само по себѣ могло вызвать такую неисправимую хрупкость въ стали. Казалось бы возможнымъ бороться съ вреднымъ вліяніемъ такого рода микроскопическаго выдѣленія феррита, если не путемъ тепловой обработки, то во всякомъ случаѣ путемъ механической обработки.

Рис. 78 представляетъ микроструктуру (*B*) и изломъ (A) пережженной стали. Поверхность излома была сошлифована и затѣмъ тѣ ея части, которыя на рисункѣ представляются ров-

ными, были протравлены. Здѣсь ясно проступаютъ большія зерна аустенита, несмотря на малое увеличеніе (33 раза). На рис. *A* въ углубленныхъ частяхъ видны блестящія ровныя поверхности, по которымъ шелъ изломъ.

Пережога, по крайней мѣрѣ очень сильнаго, нельзя исправить ни тепловымъ, ни механическимъ рафинированіемъ. Что тепловое рафинированіе остается безсильнымъ, это весьма естественно, такъ какъ дѣйствіе этого процесса состоитъ въ томъ, что онъ вызываетъ перекристаллизацію въ сплошныхъ частяхъ металла. По самой своей природѣ, этотъ процессъ совершенно неспособенъ къ тому, чтобы вызвать замыканіе тѣхъ промежутковъ, которые возникаютъ между зернами.

Слѣдующія данныя, полученныя однимъ изъ моихъ ассистентовъ, указываютъ въ общихъ чертахъ, насколько усиливается вредъ, приносимый перегрѣвомъ, съ повышеніемъ температуры, и насколько уменьшается благотворное вліяніе теплового рафинированія при переходѣ температуры изъ области IV въ область II. Несмотря на то, что эти данныя были выставлены въ моемъ музеѣ уже въ теченіе нѣсколькихъ лѣтъ, я обязанъ этимъ обобщеніемъ, что пережогъ наступаетъ при переходѣ изъ области IV въ область II, профессору Stansfield'у. Слѣдуетъ замѣтить, что послѣ нагрѣванія при 1250° сталь стала настолько хрупкой, что она ломалась при изгибѣ на 14°, послѣ же рафинированія ее можно было согнуть на 144°, прежде чѣмъ она сломалась. Болѣе высокій нагрѣвъ только слегка усилилъ ея хрупкость, но зато исправляющее дѣйствіе рафинированія сказывалось затѣмъ относительно мало.

Въ полномъ согласіи съ этимъ положеніемъ находится и то обстоятельство, что высокоуглеродистая сталь гораздо болѣе подвержена пережогу, чѣмъ низкоуглеродистая. Различіе между этими двумя видами стали въ отношеніи ихъ чувствительности къ пережогу слишкомъ велико, чтобы его можно было отнести на счетъ разницы температуръ, при которыхъ начинается ихъ замерзаніе; скорѣе это различіе надо отнести на счетъ крутого подъема лѣвой границы *Aa* области II. Слѣдовало бы провѣрить на опытѣ то, вполнѣ естественное, предположеніе, что именно эта граница опредѣляетъ собой предѣлъ температуры, при которой можетъ производиться ковка, а также температуру пережога. Во всякомъ случаѣ, очевидно, что сталь нельзя ковать

Таблица 11.

Хрупкость, вызванная въ стали перегрѣвомъ, и ея исправленіе при помощи теплового рафинированія.

Приблизительная температура, до которой сталь была нагрѣта	Тягучесть стальныхъ брусковъ съ поперечнымъ сѣченіемъ $\frac{5}{16}$ кв. дюйма, при содержаніи углерода 1,20%. Уголъ, на который кусокъ сгибался, прежде чѣмъ сломаться	
	Не рафинированный брусокъ	Рафинированный брусокъ
1250°	14°	144°
1300°	7°	21°
1350°	4°	10°
1400°	3°	0°

въ области II, потому что въ этой области она, нормальнымъ образомъ, должна состоять изъ механической смѣси затвердѣвшаго аустенита и расплавленнаго углеродистаго желѣза. Такая смѣсь, частью твердая, частью расплавленная, едва ли въ состояніи выдержать ковку, потому что подъ вліяніемъ ударовъ молота расплавленная часть должна выдавливаться, и вся масса должна распасться на куски. Это, въ сущности, очень обыденное явленіе, наблюдаемое въ тѣхъ случаяхъ, когда пробуютъ ковать сталь при температурѣ пережога.

Какъ и слѣдовало ожидать, для исправленія пережженой стали механическое рафинированіе, напримѣръ, при помощи прокатки и т. п., служитъ гораздо болѣе дѣйствительнымъ средствомъ, чѣмъ тепловое рафинированіе. Ибо, тепловое рафинированіе совершенно безсильно вызвать замыканіе даже мельчайшихъ трещинъ, сжатіе же и сдавливаніе, которымъ сопровождается механическое рафинированіе, оказываются очень дѣйствительнымъ средствомъ для того, чтобы вызвать замыканіе даже значительныхъ по величинѣ трещинъ, особенно если стѣнки послѣднихъ не покрыты слоемъ окиси желѣза.

222) Почему болванки и другія отливки не подвергаются пережогу при охлажденіи въ интервалѣ пережога?—Спрашивается, какимъ же образомъ возможно получить въ хорошемъ

состоянiи сталь, отлитую въ расплавленномъ состоянiи въ болванки или другiя отливки и прошедшую при охлажденiи черезъ весь температурный интервалъ между точкой плавленiя и обыкновенной температурой, слѣдовательно прошедшую и черезъ тотъ температурный интервалъ, въ которомъ возникаетъ этотъ неисправимый порокъ—«пережогъ»? Несомнѣнно, что болванки *и другiя отливки при такомъ охлажденiи не подвергаются* пережогу, тогда какъ стальные бруски, будучи нагрѣты до этой температуры и охлаждены, все равно быстро или медленно, оказываются неисправимо пережжеными.

На это напрашиваются три объясненiя:

1) Пережогъ связанъ съ подъемомъ температуры, и простое охлажденiе черезъ ту же температуру не можетъ вызвать пережога.

Правда, нагрѣванiе въ извѣстномъ температурномъ интервалѣ можетъ оказывать совершенно иное дѣйствiе, чѣмъ охлажденiе въ томъ же интервалѣ. Но часто случается, что болванку стали, внѣшняя кора которой затвердѣла, внутренняя же часть остается еще расплавленной, помѣщаютъ въ специальной конструкцiи печь для нагрѣванiя. При этомъ по крайней мѣрѣ часть затвердѣвшей коры вновь нагрѣвается почти до точки плавленiя за счетъ тепла расплавленной внутренней части. Однако, такiя болванки при этомъ не подвергаются пережогу, несмотря на то, что здѣсь происходитъ подъемъ температуры именно въ томъ интервалѣ, въ которомъ брусокъ испытываетъ пережогъ. Такимъ образомъ, мы принуждены отбросить это объясненiе за его несостоятельностью.

2) Пережогъ обусловливается окисленiемъ поверхностей кристаллическихъ зеренъ, изъ которыхъ состоитъ металлъ, вслѣдствiе идущей внутрь диффузiи кислорода воздуха. Такiя пленки окиси желѣза, хотя бы они были очень тонки и не непрерывны, конечно, могутъ, располагаясь извѣстнымъ образомъ, вызывать въ металлѣ непрочность по нѣкоторымъ плоскостямъ. Этимъ и можетъ объясняться вредъ, причиняемый нагрѣванiемъ до высокой температуры. Но при охлажденiи болванки или отливки выдѣляется значительное количество водорода, растворенняго какъ таковой или «окклюдированнаго» расплавленнымъ металломъ. Выдѣляясь наружу, водородъ можетъ механически препятствовать внѣдренiю кислорода, а также и противодѣйство-

вать ему химически. Это объясненіе, повидимому, раціонально. Можно было бы провѣрить его на опытѣ, нагрѣвъ стальной брусокъ до температуры, близкой къ точкѣ плавленія въ пустотѣ или атмосферѣ водорода и убѣдившись, подвергнется ли онъ при этомъ пережогу или нѣтъ.

Такимъ образомъ, сущность этого объясненія состоитъ въ томъ, что болванки и отливки въ температурномъ интервалѣ пережога не испытываютъ пережога потому, что этому препятствуетъ выдѣленіе изъ нихъ водорода. Стальные же бруски, сдѣланные изъ этихъ болванокъ и не содержащіе болѣе водорода, подвергаются пережогу въ этомъ интервалѣ, благодаря проникавію кислорода вдоль поверхностей кристалловъ.

3) Зависитъ ли пережогъ отъ возникновенія чрезвычайно грубаго зерна и образованія между зернами настолько толстой сѣтки феррита, что нарушить послѣднюю и болѣе равномѣрно распредѣлить ферритъ представляется очень труднымъ, или отъ образованія слоя окисловъ между зернами — для третьяго объясненія безразлично.

Механическое сдавливаніе, которому подвергается болванка при прокаткѣ или ковкѣ для выдѣлки изъ нея бруска гораздо больше, чѣмъ то, которому подвергается при прокаткѣ или ковкѣ брусокъ для выдѣлки изъ него меньшаго бруска. Въ первомъ случаѣ сдавливаніе гораздо болѣе полно исправляетъ вредъ, причиненный пережогомъ, чѣмъ во второмъ. Большее сдавливаніе, которому подвергается болванка, исправляетъ пережогъ, тогда какъ слабое сдавливаніе, которое только и примѣнимо при переработкѣ стального бруска, не въ состояніи этого сдѣлать.

Это объясненіе совершенно не рѣшаетъ вопроса, почему же стальная отливка, которая вовсе не подвергается механической обработкѣ, всетаки не испытываетъ пережога при охлажденіи въ интервалѣ пережога. Очевидно, это объясненіе непримѣнимо къ данному явленію. Но такъ какъ обыкновенно отливки бываютъ защищены отъ окисленія стѣнками изложницы, то это третье объясненіе можетъ служить подтвержденіемъ второго. Другими словами, тотъ фактъ, что стальные бруски подвергаются пережогу въ интервалѣ, въ которомъ болванки пережогу не подвергаются, можетъ быть объясненъ во-первыхъ тѣмъ, что болванку защищаетъ отъ окисленія заключенный въ ней водородъ, а во-вторыхъ тѣмъ, что при сильномъ сдавливаніи

болванки измельчаются тѣ тонкія пленки окиси, которыя образуются въ ней въ видѣ сравнительно безвредныхъ очень незначительныхъ по размѣрамъ разбросанныхъ частичекъ.

Такимъ образомъ, условно, мы можемъ принять второе объясненіе, третье же будемъ считать какъ бы вспомогательнымъ.

223) Механическое рафинированіе. — Съ грубой зернистостью и сопровождающей ее хрупкостью, вызываемыми нагрѣваніемъ стали въ верхней части области IV, можно бороться при помощи механической обработки, напримѣръ, при помощи прокатки, ковки и т. п. Аустенитъ, повидимому, принадлежитъ къ правильной или кубической системѣ, поэтому зерна его нормальнымъ образомъ обладаютъ равными осями. Прокатка или ковка вызываютъ удлиненіе этихъ зеренъ въ направленіи прокатки и укороченіе въ плоскости давленія. Вслѣдствіе этого, повидимому, металлъ приходитъ въ кристаллографически нестойкое равновѣсіе, въ результатѣ чего старыя, подвергшіяся такому искаженію зерна, распадаются и образуются новыя равноосныя зерна.

Но эти новыя зерна принимаютъ размѣръ, соотвѣтствующій не той температурѣ, при которой образовались старыя зерна, а той температурѣ, которая въ данный моментъ существуетъ; температура же во время ковки или прокатки непрерывно понижается. Каждый пропускъ черезъ валки, каждый ударъ молота стремится болѣе или менѣе полно разрушить первоначальное зерно и замѣнить его новымъ зерномъ, которое бы по своей величинѣ ближе соотвѣтствовало существующей въ данный моментъ болѣе низкой температурѣ. Выражаясь болѣе точно, новое зерно приближается къ величинѣ, нормальной для существующей температуры. Но, въ сущности, результатъ будетъ одинъ и тотъ же. Ибо, если при каждомъ изъ послѣдовательныхъ пропусковъ черезъ валки разрушается существующее зерно и возникаетъ новое, тогда каждое новое зерно должно быть необходимо меньше, чѣмъ предыдущее; дѣло въ томъ, что нормальный размѣръ, къ которому новое зерно стремится, меньше, чѣмъ нормальный размѣръ, къ которому стремилось предшествующее ему зерно при болѣе высокой температурѣ, существовавшей въ то время (См. конецъ § 224).

Рис. 79 представляетъ собой попытку изобразить это явленіе графически. Здѣсь ординаты выражаютъ температуры, абс-

циссы же—величину зерна. Линія Ac_1A должна приблизительно представлять нормальную величину зерна, $D^н$, къ которой стремится сталь даннаго состава при измѣненіи температуры, иначе говоря, нормальную величину зерна. Если величина зерна меньше нормальной для данной температуры, она всегда стремится увеличиться и приблизиться къ нормальной величинѣ (законъ [2]). Если величина зерна больше нормальной, оно не обладаетъ стремленіемъ достигнуть нормальной величины (законъ [3]), за тѣмъ исключеніемъ, когда температура превышаетъ Ac_3 (законъ [8]).

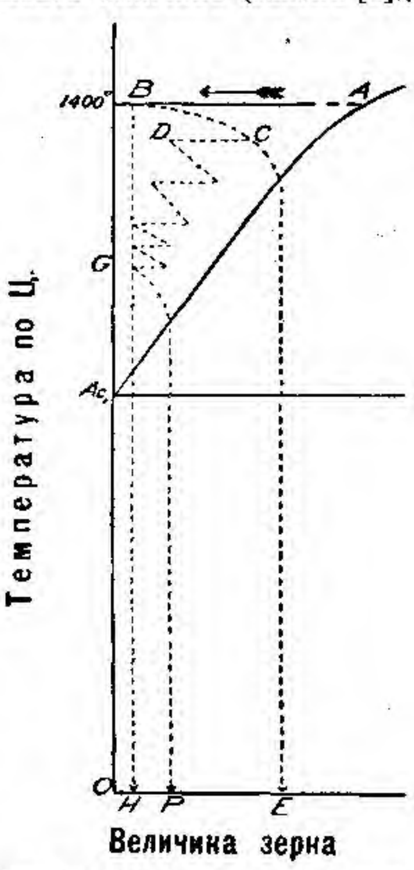


Рис. 79. Вліяніе конечной температуры механической обработки на величину зерна.

Положимъ, что мы прекратимъ прокатку куска стали въ то время, какъ его температура *B*, и что механическимъ усиліемъ валковъ зерно разрушено. При послѣдующемъ охлажденіи зерно будетъ расти, какъ это приблизительно представлено линіей *BCE*. Возобновивъ прокатку, когда зерно достигаетъ *C*, мы тѣмъ самымъ вновь разрушимъ его, и оно приметъ, скажемъ, величину *D*. Далѣе процессъ идетъ точно такимъ же образомъ. Въ промежуткахъ между пропусками черезъ валки зерно растетъ, и температура одновременно понижается, при каждомъ же пропускѣ черезъ валки, подъ вліяніемъ сдавливанія, испытываемаго металломъ, зерно вновь разрушается. Кривая, выражающая величину зерна и температуру, при этомъ образуетъ зигзагообразную линію *BCDG*.

Если мы прекратимъ прокатку, когда температура понизится до *G*, то зерно будетъ расти по мѣрѣ охлажденія металла до тѣхъ поръ, пока линія, выражающая дѣйствительную величину зерна, не пересѣчетъ линію, выражающую нормальную величину

зерна, Ac_1A; при дальнѣйшемъ охлажденіи зерно болѣе не будетъ расти, и его окончательная величина будетъ равна OP. Если бы быстро охладить металлъ въ G, окончательная величина его зерна была бы OH. Если бы мы прекратили прокатку при температурѣ B, окончательная величина зерна у охлажденной стали была бы OE. Нѣтъ нужды упоминать о томъ, что эти кривыя нанесены безъ всякой претензіи на то, чтобы выражать численныя соотношенія; болѣе того, я не могу съ увѣренностью утверждать, что ихъ общій видъ вполнѣ правиленъ; повидимому, однако, они находятся въ согласіи съ наблюдаемыми явленіями.

224) Температура окончанія прокатки.—Если предыдущіе взгляды правильны, то величина зерна должна быть тѣмъ меньше, чѣмъ ниже температура, при которой происходитъ въ послѣдній разъ его искаженіе, все равно, вызывается ли это искаженіе послѣднимъ пропускомъ черезъ валки или послѣднимъ ударомъ молота. Или, попросту говоря, зерно будетъ тѣмъ грубѣе, чѣмъ выше температура окончанія прокатки. Назовемъ это положеніе закономъ девятымъ или закономъ температуры окончанія прокатки:

[9] . . . . $D:D'=FT:FT'$,

гдѣ FT обозначаетъ температуру окончанія прокатки.

Рис. 79а служитъ иллюстраціей для этого положенія. Здѣсь представлена микроструктура двухъ одинаковыхъ брусковъ, сдѣланныхъ изъ одной и той же стали. Каждый изъ этихъ брусковъ былъ нагрѣтъ до 1394° Ц., затѣмъ охлажденъ до температуры, указанной на рисункѣ, затѣмъ прокатанъ и послѣ того медленно охлажденъ. Температуры 963° и 837° и являются для нихъ «температурами окончанія прокатки». Ясно видно, насколько грубѣе зерно бруска A, механическая обработка котораго закончена при 963°, по сравненію съ брускомъ B, механическая обработка котораго закончена при 837°.

Возможность регулированія величины зерна при помощи измѣненія температуры окончанія прокатки чрезвычайно важна. Въ общемъ, всегда проявляется склонность, въ видахъ экономіи силы, прокатывать или ковать сталь при возможно болѣе высокой температурѣ, потому что, чѣмъ выше температура стали, тѣмъ она мягче и тѣмъ меньше затрачивается силы на ея про-

катку или ковку. Но это должно вызывать грубозернистое строеніе и хрупкость. Поэтому высокая температура желательна въ отношеніи затраты силы, но нежелательна въ отношеніи качества стали.

Для того, чтобы соблюсти оба эти условія, часто можетъ быть выгоднымъ вести, для экономіи силы, большую часть прокатки при высокой температурѣ, а для пониженія температуры окончанія прокатки примѣнять какой-либо спеціальный пріемъ. Такъ, напримѣръ, при прокаткѣ трубъ первоначально поддерживается высокая температура, когда же труба приметъ почти желаемый размѣръ, на нее направляется струя воды для того, чтобы ускорить ея охлажденіе; результатомъ является быстрое паденіе температуры въ послѣднемъ періодѣ прокатки, и получается мелкое зерно.

Микроструктура стали (0,50% углерода), нагрѣтой до 1394°, затѣмъ медленно охлажденной до

963° (A) 837° (B)

затѣмъ прокатанной и медленно охлажденной.

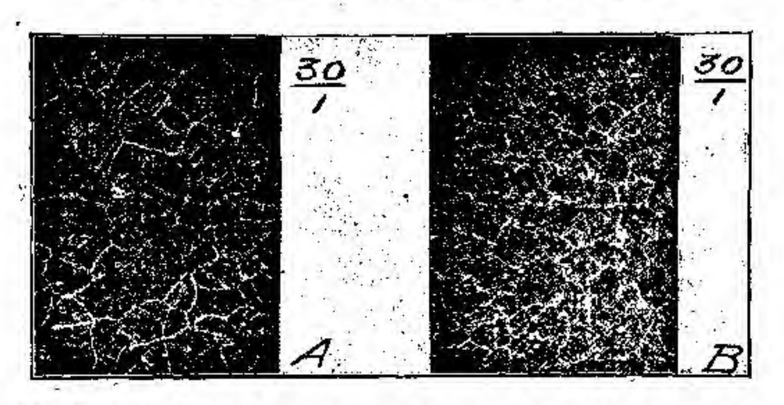


Рис. 79*a*. Вліяніе конечной температуры прокатки на величину зерна стали, содержащей 0,50% углерода.

Микрофотографія Wm. Campbell, лабораторія автора. Увеличеніе 30.

При прокаткѣ рельсовъ преслѣдуется та же цѣль. Головка рельса гораздо толще остальной его части; поэтому она охлаждается много медленнѣе послѣдней въ то время, когда путемъ прокатки первоначальному квадратному бруску придается форма рельса; короче говоря, головка рельса стремится сохранить го-

раздо болѣе высокую температуру окончанія прокатки, чѣмъ остальная его часть. Во избѣжаніе этого прибѣгаютъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ къ слѣдующему пріему. На извѣстной стадіи прокатки, когда брусокъ уже начинаетъ приближаться по формѣ къ рельсу, его слегка нагрѣваютъ, при чемъ стараются, чтобы та часть его, которая должна образовать головку, нагрѣвалась слабѣе остальной части, которая должна образовать пяту; для этого часть, изъ которой образуется головка, приводится въ соприкосновеніе съ дномъ печи, остальная же часть приходится наверху и подвергается наибольшему нагрѣванію. Можно также часть, изъ которой должна образоваться головка, охлаждать во время прокатки сильной струей воды.

Въ частности, въ процессѣ Kennedy—Morrison, передъ послѣднимъ пропускомъ черезъ валки прокатка на время пріостанавливается для того, чтобы понизить температуру ея окончанія. Предметамъ, подлежащимъ сваркѣ, обыкновенно заранѣе придаютъ такую форму, чтобы они были въ мѣстѣ соединенія гораздо толще, чѣмъ въ окончательномъ видѣ послѣ сварки. Послѣ сварки въ прямомъ смыслѣ, т. е. послѣ первыхъ ударовъ, вызывающихъ прочное соединеніе двухъ кусковъ, продолжаютъ ковку, для того, чтобы придать въ этомъ мѣстѣ предмету толщину, которую онъ долженъ имѣть въ окончательномъ видѣ; далѣе ковка ведется до тѣхъ поръ, пока температура не упадетъ до достаточно низкой точки, чтобы не могло быть опасеній за качество стали въ этомъ мѣстѣ. Конечная цѣль такого рода обработки заключается въ томъ, чтобы при помощи низкой температуры окончанія ковки вызвать въ мѣстѣ сварки и около него, гдѣ поневолѣ металлъ приходится нагрѣвать очень сильно, мелкое зерно и сопровождающія его хорошія свойства. Цѣлью, однимъ словомъ, является механическое рафинированіе по необходимости перегрѣтыхъ частей.

Мы только еще начинаемъ собирать данныя относительно благотворнаго вліянія, оказываемаго механическимъ рафинированіемъ. Положимъ, что мы будемъ при прокаткѣ рельсовъ производить всѣ пропуски черезъ валки при очень высокой температурѣ, кромѣ послѣдняго пропуска, который мы произведемъ при надлежащей температурѣ. Едва ли можно предполагать, чтобы послѣднимъ пропускомъ можно было навѣрно и совершенно исправить весь вредъ, причиненный предыдущимъ

сильнымъ нагрѣваніемъ, въ особенности, если послѣдній пропускъ черезъ валки сопровождается очень незначительнымъ уменьшеніемъ сѣченія прокатываемаго предмета, какъ это по необходимости почти всегда и бываетъ. Такъ, изъ сравненія величины зерна на рис. 76а и на рис. 79а, можно видѣть, что зерно куска стали, прокатаннаго при 963° послѣ медленнаго охлажденія съ 1394° (*A*, рис. 79а), гораздо грубѣе, чѣмъ зерно куска стали (*C*, рис. 76а), просто нагрѣтаго до 966° и затѣмъ медленно охлажденнаго. Очевидно, механическое рафинированіе повело за собою уменьшеніе величины зерна, однако, гораздо менѣе значительное, чѣмъ простое нагрѣваніе до той же температуры, 966°. Другими словами, величина зерна, соотвѣтствующая одной и той же температурѣ, гораздо меньше въ томъ случаѣ, когда эта температура является T^{max}, чѣмъ въ томъ случаѣ, когда она является температурой окончанія прокатки. Получилась ли бы при большемъ сдавливаніи между валками при данной температурѣ окончанія прокатки структура почти одинаковая по величинѣ зерна съ той, которая получается при той же температурѣ, когда она является T^{max}, остается пока невыясненнымъ.

225) Дальнѣйшее изученіе вліянія T^{max} на физическія свойства.—Нами уже было указано, что грубозернистая структура, возникающая подъ вліяніемъ чрезвычайно большого перегрѣва, очень сильно сказывается на ухудшеніи качествъ стали. При этомъ было высказано въ видѣ общаго положенія, что качество данной разновидности стали тѣмъ выше, чѣмъ мельче ея зерно; однако это оказывается справедливымъ только до тѣхъ поръ, пока разница въ величинѣ зерна очень значительна, т. е. пока мы сравниваемъ между собой качества грубозернистыхъ образцовъ съ качествами мелкозернистыхъ. Но разъ дѣло касается разсмотрѣнія свойствъ, соотвѣтствующихъ различной величинѣ зерна въ мелкозернистой стали, полученной, слѣдовательно, при помощи низкой T^{max} или низкой температуры окончанія прокатки, этотъ законъ надо формулировать гораздо точнѣе. Въ нѣкоторыхъ отношеніяхъ очень низкая T^{max} или очень низкая температура окончанія прокатки могутъ оказаться менѣе желательными, чѣмъ нѣсколько болѣе высокія.

Было бы чрезвычайно желательно приступить теперь къ изученію зависимости между величиной зерна и физическими

Таблица 12.

Вліяніе температуры, съ которой сталь подверглась медленному охлажденію, на ея физическія свойства [1]).

Медленное охлажденіе послѣ нагрѣва до	Сопротивленіе разрыву въ фунт. на кв. дюймъ.	Предѣлъ упругости въ фунт. на кв. дюймъ.	Удлиненіе въ %.	Сокращеніе сѣченія въ %
Сталь № 164.	Углеродъ = 0,035	(Si = 0,093		P = 0,093)
750°	28,353	19,948	28,00	79,72
1100°	28,657	18,130	30,00	78,37
1300°	28,529	12,142	35,00	77,01
1400°	30,064	11,483	13,25	76,46
Сталь № 39.	Углеродъ = 0,22	(Mn = 0,44;	P = 0,008;	S = 0,018)
750°	52,608	30,715	15,25	68,54
1100°	52,374	19,242	15,00	61,84
1300°	52,241	19,159	19,25	58,77
1400°	50,313	12,880	—	56,62
Сталь № 193. Углеродъ = 0,70 (Si = 0,141; Mn = 0,068; P = 0,012; S = 0,010)				
750°	82,660	40,062	12,00	25,42
1100°	92,342	59,363	13,12	20,35
1300°	48,021	29,247	1,12	17,22
1400°	41,327	33,082	1,25	15,10
Сталь № 46. Углеродъ = 0,92 (Si = 0,124; Mn = 0,240; P = 0,014; S = 0,025)				
750°	81,087	34,710	13,50	43,66
1100°	109,586	39,226	7,50	14,14
1300°	106,913	33,992	4,50	7,88
1400°	64,189	42,008	0,50	5,13
Сталь № 192.	Углеродъ = 1,04	Mn = 0,12;	P = 0,012;	S = 0,017)
750°	83,046	51,400	13,75	53,84
1100°	107,814	65,926	10,37	22,17
1300°	88,376	48,643	3,37	16,23
1400°	46,055	32,051	0,87	11,24

[1]) Изъ каждаго изъ пяти образцовъ стали было вырѣзано по четыре куска. Затѣмъ эти куски чрезвычайно медленно нагрѣвались до указанной температуры. При каждомъ нагрѣваніи пять различнаго сорта кусковъ плотно складывались и помѣщались въ длинный узкій муфель. Посреди ихъ помѣщалась термо-пара пирометра Le Chatelier. Муфель плотно закрывался съ обоихъ концовъ и вводился въ спеціально приспособленную цилиндрическую газовую печь, при чемъ послѣдняя также закрывалась съ обоихъ концовъ. Муфель цѣликомъ охватывался пламенемъ. Повышеніе температуры производилось очень медленно, особенно къ концу нагрѣванія. Затѣмъ сталь медленно охлаждалась въ муфелѣ. Опыты произведены I. C. Bull'емъ подъ наблюденіемъ автора.

Таблица 13.

Вліяніе температуры окончанія прокатки на физическія свойства стали, содержащей 0,50% углерода. W. Campbell.

Брусокъ №	Серія №	Температура нагрѣва.	Температура прокатки.	Свойства.			
				Сопротивленіе разрыву въ фунт. на кв. дюймъ.	Предѣлъ упругости въ фунт. на кв. дюймъ.	Удлиненіе въ %.	Сокращеніе сѣченія въ %.
A	—	1390°	Не прокатанный.	102,000	60,700	3,4	5,5
1	1	1399°	874°	119,700	110,200	—	16,6
2	»	»	820°	123,000 109,500	96,500	9	26,3
3	»	»	749°	115,400	77,000	7	20,5
			$A_{r\,2-3}$ при 700° ±				
4	»	»	686°	111,600	79,200	5,25	8,3
1	2	1394°	963°	126,800	86,050	9,6	28,0
2	»	»	909°	{127,400 {128,300	86,800	10,25	27,0
3	»	»	837°	128,400	84,400	10,25	29,7
4	»	»	809°	126,000	84,700	10,75	33,0
5	»	»	781°	126,500	87,700	10,0	33,4
6	»	»	755°	130,000	95,100	8,0	39,0
7	»	»	724°	124,200	89,400	9,4	41,3
			$A_{r\,2-3}$ при 700° ±				
8	»	»	695°	129,100	94,700	9,75	29,6
9	»	»	669°	130,200	98,050	8,75	27,3

свойствами, представляющими большую практическую важность, какъ сопротивленіе разрыву, предѣлъ упругости и тягучесть. Но, къ сожалѣнію, на этотъ счетъ у насъ имѣется въ распоряженіи слишкомъ мало прямыхъ данныхъ. Поэтому мы обратимся къ зависимости между T^{max} и температурой окончанія прокатки съ одной стороны и физическими свойствами съ другой стороны. Даже и въ этомъ отношеніи наши свѣдѣнія чрезвычайно отрывочны. Но для того, чтобы облегчить изученіе тѣхъ данныхъ, которыя имѣются подъ рукой, я нанесъ на рис. 79*b*, 79*c* и 79*d* результаты, полученные Ball'емъ и Westinghouse Machine C°, а также результаты, полученные при изслѣдованіяхъ въ моей лабораторіи. Далѣе, въ таблицѣ 12, я привожу нѣкоторые изъ позднѣйшихъ результатовъ, полученныхъ мною во время печатанія этой книги, при помощи I. C. Bull'я, который производилъ опыты, и въ таблицѣ 13 результаты, полученные Dr. Wm. Campbell'емъ въ моей лабораторіи.

Разсматривая эти результаты, прежде всего можно замѣтить, что они подтверждаютъ уже давно сдѣланное обобщеніе, что вліяніе тепловой обработки быстро усиливается съ повышеніемъ содержанія углерода (слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что сталь съ наименьшимъ содержаніемъ углерода 0,035%, при нагрѣваніи даже до 1400° практически не претерпѣла измѣненія въ отношеніи сопротивленія разрыву и сокращенія площади сѣченія).

Предѣлъ упругости.—При простомъ нагрѣваніи стали до высокой температуры, т. е. при отжигѣ, и послѣдующемъ медленномъ охлажденіи безъ примѣненія механической обработки предѣлъ упругости чрезвычайно сильно измѣняется въ зависимости отъ температуры, съ которой начинается медленное охлажденіе. По мѣрѣ повышенія этой температуры предѣлъ упругости сперва достигаетъ минимума около Ac_1, или, скажемъ, около 710° — 730° Ц., затѣмъ повышается, обыкновенно рѣзко, и достигаетъ максимума при немного болѣе высокой температурѣ, скажемъ, между 750° и 850°, и далѣе вновь постепенно понижается.

Обращаясь къ рис. 79*b*, мы видимъ, что это подтверждается данными четырехъ серій изъ пяти; но и пятая серія приводитъ къ тому же положенію, за исключеніемъ того, что въ ней гораздо слабѣе выраженъ минимумъ, чѣмъ въ другихъ серіяхъ (*W. M^c. C°.*) *A*. Данныя шестой серіи (*W. M^c. C°.*) *F*. указы-

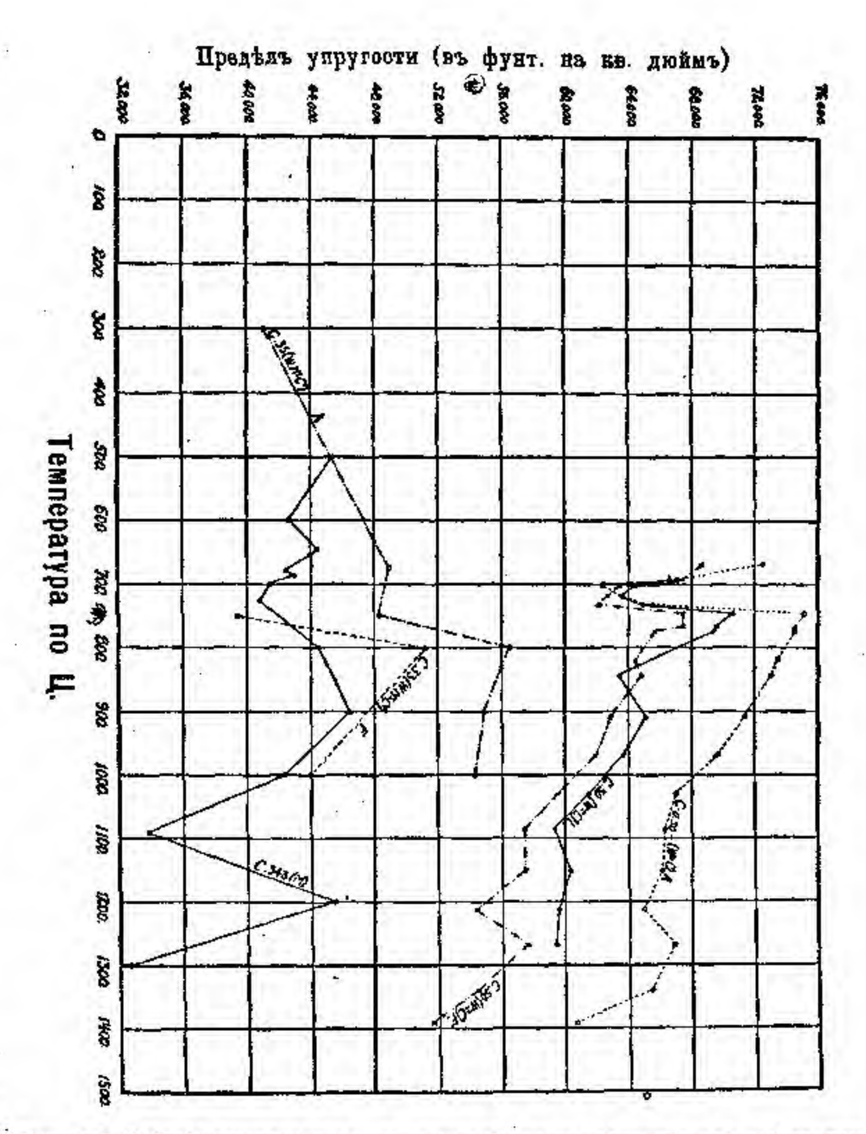


Рис. 79b. Вліяніе температуры, съ которой сталь подвергается медленному охлажденію, на предѣлъ упругости.

Примѣчаніе. Во всѣхъ случаяхъ предполагается, что сталь нагрѣвалась до указанной температуры и затѣмъ медленно охлаждалась, не подвергаясь никакой механической обработкѣ.

Обозначенія: C.33, C.50 и т. д. = 0,33, 0,50 и т. д. % углерода.

(*Am*) = Авторъ, «Trans. Am. Inst. Min. Eng.», XXIII, стр. 527, 529, 531, 532.

(*Ba*) = E. J. Ball. «Journ. Iron and Steel Inst.», 1890, I, табл. VI, рис. III.

(*B*) или (*Bd*) = R. H. Bradford. Неопубликованные результаты, полученные въ лабораторіи автора.

Wm. C.) = William Campbell. Изъ результатовъ, полученныхъ въ лабораторіи автора, и подлежащихъ опубликованію.

(*M*) = R. G. Morse. «Trans. Am. Inst. Min. Eng.» XXIX, стр. 745.

W. M°. C°.) = Westinghouse Mach. Co., «The Metallographist,» IV, апрѣль, 1903. Заглавный листъ.

A = охлажденная на воздухѣ. *F* = охлажденная въ печи.

L = охлажденная въ извести.

ваютъ на рѣзкій максимумъ, близко совпадающій съ максимумомъ, установленнымъ другими изслѣдователями; эти данныя не доказываютъ положительно существованія минимума при 750°, но, съ другой стороны, они и не содержатъ указанія на то, что этого минимума не существуетъ. Такое, совершенно неожиданное, совпаденіе данныхъ, полученныхъ тремя различными изслѣдователями, сильно говоритъ за правильность указанной выше законности. Точно также изъ таблицы 13 видно, что съ постепеннымъ повышеніемъ температуры прокатки предѣлъ упругости измѣняется подобнымъ же образомъ; по крайней мѣрѣ можно съ увѣренностью сказать, что въ данномъ случаѣ предѣлъ упругости достигаетъ ясно выраженнаго максимума безусловно выше Ar_{2-3}. Данныя второй серіи единственныя, которыя достаточно полны для того, чтобы можно было обнаружить минимумъ, и они дѣйствительно указываютъ на минимумъ, хотя и не особенно ясно выраженный, около 724° Ц., т. е. въ томъ же температурномъ интервалѣ, какъ на рис. 79*b*. За отсутствіемъ болѣе полныхъ данныхъ, я не настаиваю на послѣднемъ положеніи.

Но по крайней мѣрѣ можно сказать, что данныя относительно вліянія температуры окончанія прокатки не противорѣчатъ даннымъ относительно вліянія T^{max}. Конечно, едва ли можно даже ожидать, чтобы одинаковыя измѣненія температуры окончанія прокатки и T^{max} оказывали одинаковое дѣйствіе.

Поэтому пока мы можемъ высказать слѣдующій законъ [10]:

[10]. По мѣрѣ постепеннаго повышенія температуры, съ которой происходитъ медленное, ничѣмъ не нарушаемое, охлажденіе стали съ среднимъ содержаніемъ углерода, предѣлъ упругости охлажденной стали падаетъ до минимума, когда эта температура достигаетъ 700° (Ac_1?), затѣмъ рѣзко возрастаетъ до максимума при дальнѣйшемъ незначительномъ повышеніи температуры (приблизительно до 750° — 800° Ц.) и далѣе опять постепенно понижается.

На основаніи приведенныхъ здѣсь данныхъ мы можемъ формулировать также законъ [11]:

[11] Вообще, чѣмъ медленнѣе ведется охлажденіе стали, тѣмъ ниже будетъ ея предѣлъ упругости.

Въ полномъ согласіи съ закономъ [10] находится наблюденіе P. H. Dudley, что, хотя стальные рельсы съ очень мелкой структурой (скажемъ 10,000 зеренъ на квадр. дюймъ) тягучи и хорошо

противостоятъ изнашиванію, однако обладаютъ слишкомъ низкимъ предѣломъ упругости. Рельсъ долженъ обладать тремя главными свойствами: вязкостью, для того, чтобы противустоять точкамъ ведущихъ колесъ и не ломаться; твердостью, чтобы не изнашиваться; высокимъ предѣломъ упругости для того, чтобы онъ не могъ принять постояннаго изгиба и образовать рядъ волнъ между поддерживающими его шпалами подъ вліяніемъ огромнаго давленія, которое на него оказываютъ колеса. Согласно изслѣдованіямъ Dudley, располагающаго для нихъ всѣми средствами и обладающаго большой наблюдательностью, рельсовая сталь лучшаго по его мнѣнію состава (углерода 0,55—0,60%, кремнія 0,10—0,15, марганца 1,20, сѣры менѣе 0,06, фосфора менѣе 0,06), должна имѣть отъ 5,000 до 10,000 зеренъ на кв. дюймъ. Если она имѣетъ меньше, т. е. если зерно ея грубѣе, она будетъ слишкомъ хрупка; если она имѣетъ больше, т. е. если она мелкозерниста, она будетъ болѣе вязка, но зато предѣлъ упругости ея будетъ слишкомъ низокъ [1]).

Естественнѣе всего предположить, что низкій предѣлъ упругости, наблюдаемый въ рельсахъ съ очень мелкимъ зерномъ, вызывается болѣе низкой температурой окончанія прокатки, чѣмъ та, которая, согласно рис. 79*b*, обусловливаетъ максимальный предѣлъ упругости.

Этотъ случай интересенъ еще въ томъ отношеніи, что онъ указываетъ, насколько важно повѣрять выводы, дѣлаемые на основаніи лабораторныхъ изслѣдованій при помощи широко поставленныхъ опытовъ и техническихъ испытаній, и насколько послѣдніе способствуютъ выясненію различныхъ вопросовъ.

Тягучесть. — При содержаніи 0,34% или меньше углерода въ стали, нельзя замѣтить, чтобы измѣненіе температуры, съ которой начинается медленное охлажденіе, оказывало сколько бы то ни было значительное и закономѣрное вліяніе на тягучесть.

При 0,50% углерода (данныя Wm. Campbell) по мѣрѣ постепеннаго повышенія температуры, съ которой начинается медленное охлажденіе, тягучесть охлажденной стали слегка понижается, и это продолжается до тѣхъ поръ, пока температура не достигнетъ 1200°—1300°; при дальнѣйшемъ повышеніи темпе-

---

[1]) «The Metallographist», VI, стр. 111 и частное сообщеніе, 12 мая 1903.

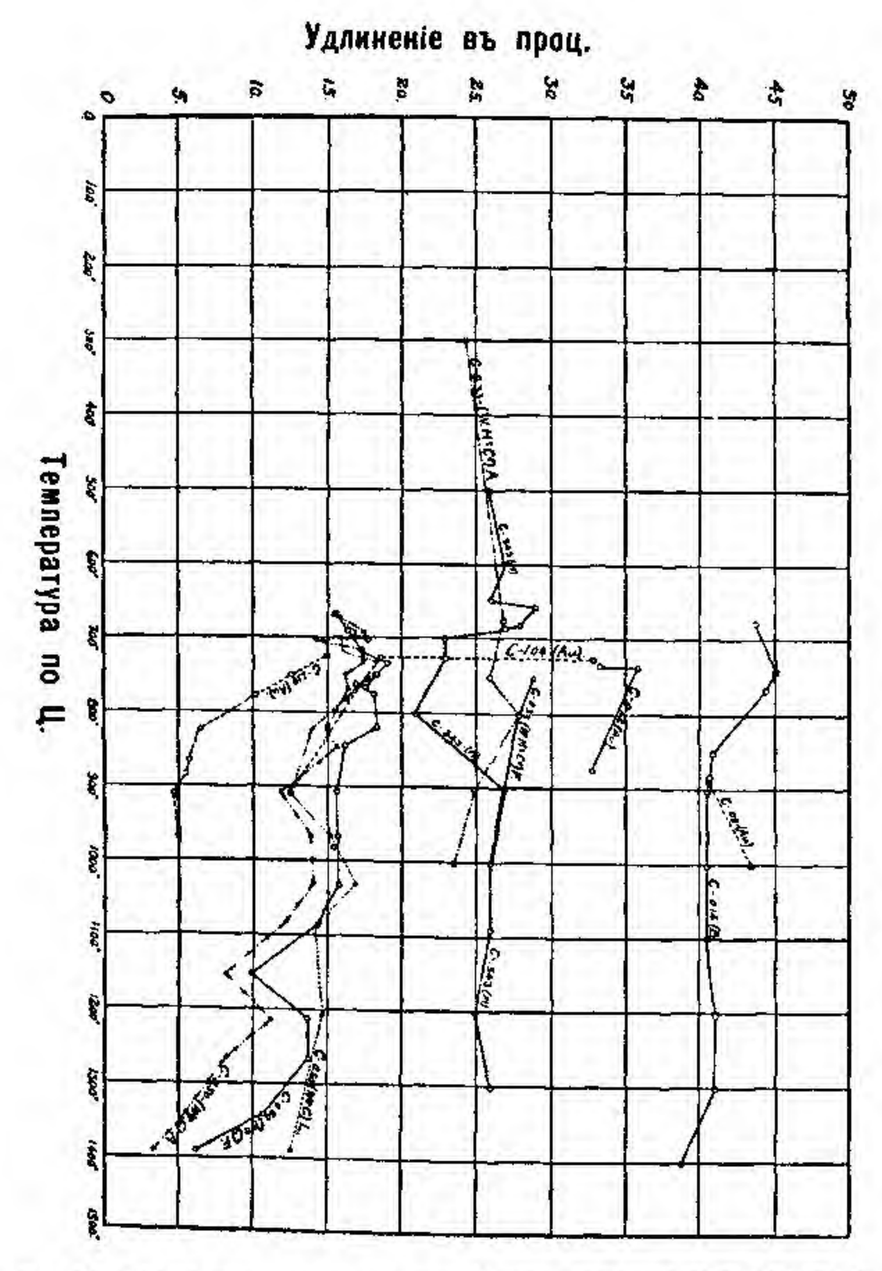


Рис. 79c. Вліяніе температуры, съ которой сталь медленно охлаждается, на тягучесть.

См. примѣчаніе и обозначенія рис. 79*b*.

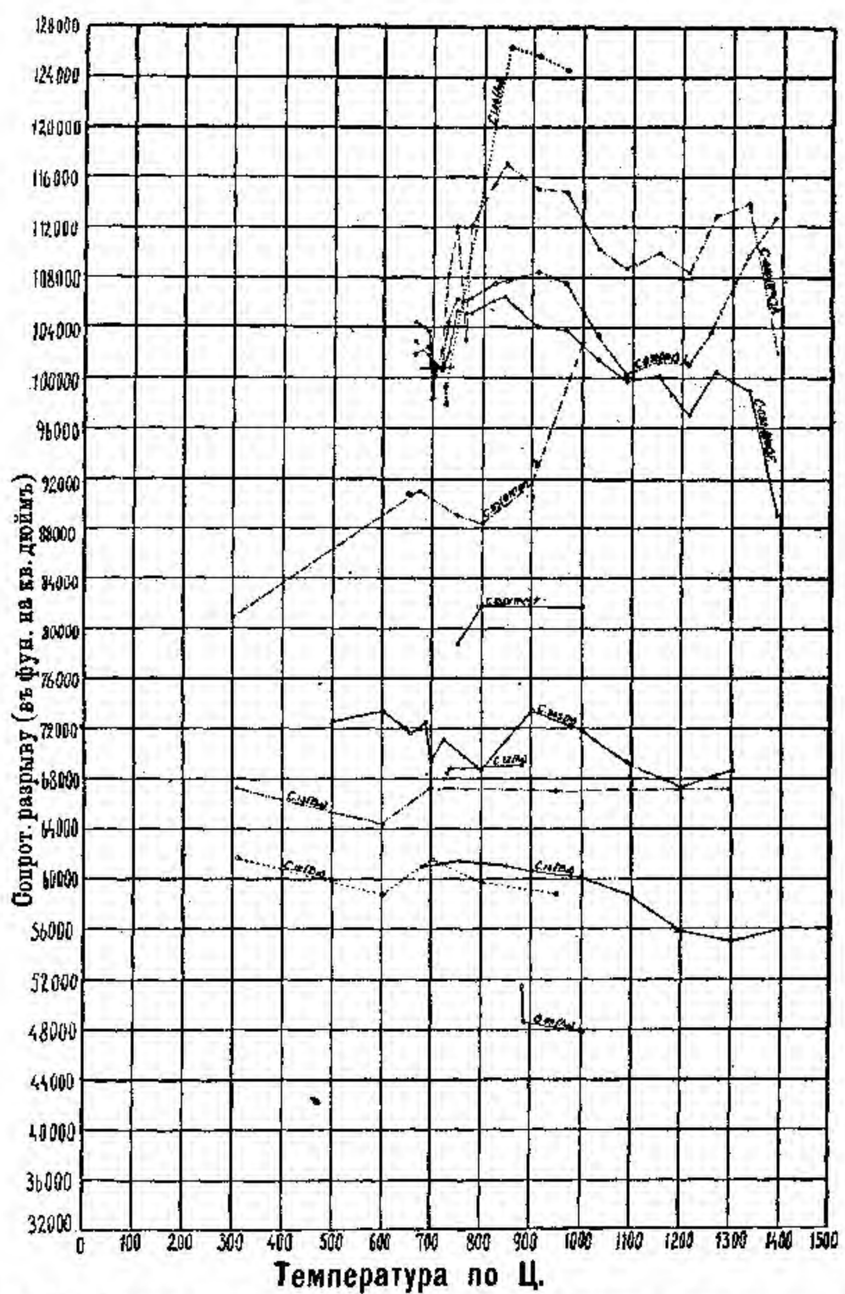


Рис. 79d. Вліяніе температуры, съ которой сталь медленно охлаждается, на сопротивленіе разрыву.

См. примѣчаніе и обозначенія рис. 79b.

ратуры тягучесть *быстро* понижается. Понижение тягучести идетъ не равномѣрно и на короткихъ участкахъ даже смѣняется повышеніемъ. Но это скорѣе можно объяснить особенностями или ошибками наблюденій, чѣмъ какимъ-либо общимъ закономъ. Въ частности, я имѣю въ виду тотъ фактъ, что, при данной тягучести или истинномъ удлиненіи наблюденная тягучесть можетъ очень значительно колебаться въ зависимости отъ положенія мѣста разрыва по длинной оси испытуемаго куска.

При 0,70% углерода получаются почти тѣ же самые результаты.

У гипер-эвтектоидной стали (4 опыта, сдѣланныя авторомъ) тягучесть непрерывно и замѣтно падаетъ съ повышеніемъ температуры, съ которой начинается медленное охлажденіе. Въ двухъ случаяхъ паденіе гораздо рѣзче выражено около Ac_1, чѣмъ при болѣе высокихъ температурахъ; данныя въ двухъ другихъ случаяхъ не даютъ яснаго указанія на такое измѣненіе въ ходѣ пониженія тягучести.

Итакъ, въ общемъ, повышеніе температуры, съ которой начинается медленное охлажденіе, вызываетъ уменьшеніе тягучести, измѣряемой конечнымъ удлиненіемъ пробныхъ кусковъ, вырѣзанныхъ изъ охлажденной стали. Вліяніе, оказываемое повышеніемъ температуры нагрѣва, быстро усиливается съ повышеніемъ содержанія углерода, при чемъ оно относительно слабо въ случаѣ стали, содержащей 0,34% углерода или меньше, и очень сильно въ случаѣ гипер-эвтектоидной стали. Существуютъ указанія на общій законъ, что уменьшеніе тягучести особенно сильно выражено по достиженіи температуры Ac_1 и хорошо выражено при температурѣ выше 1300°.

Эти результаты въ общихъ чертахъ согласуются съ давнишними изслѣдованіями проф. Sauveur [1]) надъ зависимостью между тягучестью и величиной зерна у рельсовой стали. Онъ нашелъ, что удлиненіе падаетъ съ возрастаніемъ величины зерна. Отсюда можно заключить, что удлиненіе падаетъ съ повышеніемъ температуры окончанія прокатки, *или*, другими словами, что вліяніе температуры окончанія прокатки сходно съ вліяніемъ T^{max}.

Сопротивленіе разрыву.—При меньшемъ, чѣмъ 0,33%, содержаніи углерода въ стали, температура, съ которой начинается

---

[1]) «Trans. Am. Inst. Mining Engineers» XXII, стр. 556, 1893 г.

медленное охлажденіе, повидимому, оказываетъ очень мало вліянія на сопротивленіе разрыву, насколько можно судить по приводимымъ здѣсь даннымъ. Общее, однако, мнѣніе таково, что при приближеніи температуры, съ которой производится медленное охлажденіе, къ точкѣ плавленія (вѣроятно, когда температура вступаетъ въ область II, рис. 68), сопротивленіе разрыву уменьшается. Приводимыя здѣсь данныя не даютъ указаній относительно низкоуглеродистой стали для столь высокой температуры.

У стали съ бóльшимъ содержаніемъ углерода, сопротивленіе разрыву сперва увеличивается по мѣрѣ того, какъ температура, съ которой производится медленное охлажденіе, повышается выше Ac_1 до 800°, или въ нѣкоторыхъ случаяхъ даже до 900° и 1000°. Затѣмъ, послѣ небольшихъ колебаній, сопротивленіе разрыву рѣзко падаетъ (*сталь съ* 0,50% *углерода*) при приближеніи температуры къ 1400° Ц. Это рѣзкое паденіе можетъ отвѣчать вступленію въ область II, рис. 68.

Когда температура, съ которой начинается медленное охлажденіе, превышаетъ Ac_1, увеличеніе сопротивленія разрыву бываетъ гораздо болѣе рѣзко выражено въ томъ случаѣ, когда охлажденіе ведется на воздухѣ, чѣмъ при еще болѣе медленномъ охлажденіи въ печи; само собой, этотъ фактъ наводитъ на мысль, что даже охлажденіе на воздухѣ можетъ оказаться достаточно быстрымъ для того, чтобы вызвать извѣстную степень закалки, т. е., чтобы не дать дойти до конца превращенію аустенита въ перлитъ и избыточный ферритъ или цементитъ. По этому вопросу очень желательны дальнѣйшія изслѣдованія. Но уже и теперь опыты Dr. Campbell съ охлажденіемъ въ извести и въ печи указываютъ на существенное увеличеніе сопротивленія разрыву, которое слишкомъ правильно и постоянно, для того, чтобы его можно было объяснить ошибками наблюденій, но въ то же время его едва ли можно относить и на счетъ закалки.

Данныя Dr. Campbell въ таблицѣ 13 не указываютъ на то, чтобы температура окончанія прокатки оказывала замѣтное вліяніе на сопротивленіе разрыву, вѣроятно, потому, что онѣ ограничивались небольшимъ интерваломъ между 669° и 963° Ц.

Незначительное вліяніе, оказываемое температурой, съ которой начинается медленное охлажденіе, на сопротивленіе разрыву, согласуется съ давнишними изслѣдованіями профессора

Sauveur[1]) относительно зависимости между величиной зерна и сопротивленіемъ разрыву у рельсовой стали. Однако, и въ данномъ случаѣ, надо замѣтить, что изслѣдованія были произведены въ слишкомъ ограниченномъ температурномъ интервалѣ; ибо въ данныхъ Sauveur'а можно найти указаніе на то, что при немного болѣе высокой температурѣ окончанія прокатки сопротивленіе на разрывъ становится больше, приблизительно какъ это представлено на рис. 79*d*.

Тепловая обработка чугуна.

226) Тепловая обработка чугуна.—Результаты, достигаемые при заводской обработкѣ чугуна, могутъ быть легко объяснены a) существованіемъ двухъ діаграммъ для системъ желѣзо-углеродъ, неустойчивой діаграммы аустенитъ-цементитъ, слѣдованію которой благопріятствуетъ быстрое охлажденіе и присутствіе сѣры и марганца, и устойчивой діаграммы аустенитъ-графитъ, слѣдованію которой благопріятствуетъ медленное охлажденіе и присутствіе кремнія; *b*) тѣмъ, что при реакціи 14) металлъ перестаетъ слѣдовать діаграммѣ аустенитъ-цементитъ и слѣдуетъ діаграммѣ аустенитъ-графитъ; *c*) наконецъ, тѣмъ, что при реакціяхъ 9) и 11) аустенитъ переходитъ въ ферритъ и цементитъ.

Конечно, не надо при этомъ забывать, что реакція 14) протекаетъ чрезвычайно вяло и что реакціи 9) и 11) требуютъ значительнаго промежутка времени; однимъ словомъ, первая протекаетъ съ большимъ замедленіемъ, вторыя же испытываютъ нѣкоторое замедленіе.

Регулируя слѣдованіе той или другой діаграммѣ и пользуясь замедленіемъ этихъ реакцій, мы получаемъ возможность останавливать реакціи на извѣстной стадіи, а слѣдовательно и измѣнять по желанію свойства чугуна при тепловой обработкѣ.

Разсмотримъ теперь нѣкоторые изъ процессовъ тепловой обработки, а именно: 1) закалку чугуна при выдѣлкѣ закаленныхъ отливокъ; 2) отжигъ этихъ отливокъ; 3) процессъ изготопленія отливокъ изъ ковкаго чугуна.

Сосредоточимъ вниманіе на изученіи чугуна, содержащаго 4% углерода.

---

[1]) Loc. cit.

227) Закалка чугуна.—Этотъ процессъ заключается въ томъ, что заставляютъ внѣшнія части предметовъ изъ чугуна затвердѣвать и охлаждаться съ сравнительно большою скоростью.

Этого достигаютъ отливкой чугуна въ желѣзныя изложницы, а не въ формы изъ песку, который отнимаетъ тепло гораздо медленнѣе, чѣмъ желѣзо. Составъ обрабатываемаго указаннымъ путемъ чугуна, а въ особенности содержаніе въ немъ кремнія, подгоняется такъ, чтобы стремленіе къ слѣдованію діаграммѣ аустенитъ-цементитъ и діаграммѣ аустенитъ-графитъ были почти уравновѣшены. Вслѣдствіе этого, быстро охлаждающаяся корка отливки слѣдуетъ почти исключительно діаграммѣ аустенитъ-цементитъ, и въ ней образуется очень мало графита. Внѣшняя часть отливки, такимъ образомъ, пріобрѣтаетъ чрезвычайную твердость, во-первыхъ, потому, что она содержитъ много цементита, а во-вторыхъ, вѣроятно, потому что быстрое охлажденіе въ области VII и VIII задерживаетъ переходъ аустенита въ перлитъ и цементитъ путемъ реакцій 12) и 13).

228) Отжигъ закаленныхъ отливокъ изъ чугуна. — Для многихъ цѣлей закаленныя отливки изъ чугуна слишкомъ хрупки, напр. для вагонныхъ колесъ. Такія отливки подвергаются отжигу, путемъ нагрѣванія ихъ до темно-краснаго каленія; при этомъ пересыщенный аустенитъ расщепляется на перлитъ и цементитъ, т. е. подвергается превращенію, которому онъ долженъ былъ бы подвергнуться при охлажденіи въ области VII и при переходѣ черезъ линію PSP', если бы охлажденіе шло медленно. Но и послѣ отжига отливки, или по крайней мѣрѣ ихъ внѣшняя часть, остаются бѣлыми и чрезвычайно твердыми; бѣлыми потому, что они остаются свободными отъ графита, очень твердыми потому, что онѣ содержатъ очень много цементита. Если бы было возможно охлаждать отливки чрезвычайно быстро въ *области II или III и въ области VII, положимъ до 800° Ц., заставляя* такимъ путемъ металлъ слѣдовать діаграмѣ аустенитъ-цементитъ (т. е. получая металлъ свободнымъ отъ графита и съ большимъ содержаніемъ цементита), а далѣе медленно охлаждать ихъ ниже Ar_1, чтобы аустенитъ имѣлъ время распасться на перлитъ и цементитъ, то, безъ сомнѣнія, въ результатѣ мы достигли бы того же строенія и той же твердости, какъ и при указанной выше двойной операціи. На практикѣ, однако, гораздо удобнѣе разбивать операцію на двѣ части,—на полное быстрое охлажденіе (закалка) и послѣдующее нагрѣваніе (отжигъ).

Здѣсь, такъ же, какъ и въ случаѣ стали, отжигъ ослабляетъ внутреннее напряженіе, возникающее подъ вліяніемъ очень быстраго, а слѣдовательно и неравномѣрнаго охлажденія.

Такъ какъ только ободъ вагоннаго колеса долженъ обладать твердостью, чтобы противустоять изнашиванію, и такъ какъ закаленный, т. е. бѣлый, чугунъ относительно хрупокъ даже послѣ отжига, то такіе предметы отливаются въ изложницы, сдѣланныя частью изъ песка и частью изъ желѣза; благодаря этому, ободъ колеса закаливается и получается бѣлымъ и богатымъ цементитомъ, остальная же часть охлаждается медленно и не закаливается, т. е. получается сѣрой въ изломѣ. Такимъ образомъ, ободъ колеса пріобрѣтаетъ чрезвычайную твердость, вслѣдствіе большой пропорціи цементита, внутренняя же часть колеса находится въ состояніи сравнительно тягучаго сѣраго чугуна, въ которомъ значительная часть цементита замѣщена механической смѣсью феррита и графита.

На практикѣ, закаленныя колеса удаляются изъ изложницъ въ то время, когда они, за исключеніемъ только обода, находятся еще при красномъ каленіи, и помѣщаются въ колодецъ, гдѣ они затѣмъ продолжаютъ охлаждаться очень медленно. При этомъ, ободъ вновь разогрѣвается благодаря теплу, заключающемуся въ тѣлѣ колеса.

При закалкѣ очень массивныхъ предметовъ изъ чугуна, какъ напр. большихъ валковъ, не приходится спеціально прибѣгать къ отжигу, потому что такія отливки, благодаря своей величинѣ и формѣ, охлаждаются достаточно медленно въ области VII и въ верхней части области VIII, для того, чтобы аустенитъ могъ распасться на перлитъ и цементитъ. Скорость охлажденія въ внѣшней части отливки достаточна, чтобы воспрепятствовать переходу сколько-нибудь значительной части углерода въ графитъ, но не настолько велика, чтобы задержать превращеніе аустенита въ перлитъ и цементитъ, реакціи 12) и 13).

229) Изготовленіе ковкихъ отливокъ. — Для изготовленія ковкихъ отливокъ примѣняется бѣлый чугунъ, т. е. чугунъ, въ которомъ при обычномъ, сравнительно быстромъ затвердѣваніи, образуется очень мало графита.

Въ такомъ чугунѣ цементитъ содержится въ ненормально большой пропорціи. Отливки изъ такого бѣлаго чугуна подвергаются затѣмъ «отжигу» при помощи нагрѣванія ихъ въ теченіе

нѣсколькихъ дней при температурѣ, лежащей въ области VII (скажемъ, 900°—1000°).

При этомъ получаетъ возможность образоваться графитъ, который долженъ былъ бы выдѣлиться раньше, если бы замерзаніе шло достаточно медленно. Часть выдѣлившагося такимъ путемъ графита удаляется при помощи нагрѣванія этихъ отливокъ въ окиси желѣза. Реакція идетъ слѣдующимъ путемъ:

$$Fe_3O_4 + C = CO + 3FeO.$$

По мѣрѣ того, какъ углеродъ удаляется изъ поверхностнаго слоя отливки, на его мѣсто диффундируетъ изнутри новое количество углерода. Мы можемъ предположить, что въ дѣйствительности диффундируетъ углеродъ, находящійся въ состояніи твердаго раствора или аустенита, и что диффузія и переходъ раствореннаго углерода въ свободное состояніе, или состояніе графита, идутъ рука объ руку; можно также предположить, что съ окисью желѣза непосредственно реагируетъ графитъ.

Мы можемъ разсматривать эти отливки, какъ разновидность сѣраго чугуна, обладающую тѣмъ только преимуществомъ надъ обыкновеннымъ сѣрымъ чугуномъ, что крупинки графита, образующіяся въ немъ при нагрѣваніи въ области VII (при отжигѣ), чрезвычайно мелки, а слѣдовательно сообщаютъ металлу гораздо меньшую хрупкость, чѣмъ большія крупинки эвтектическаго графита, образующіяся, когда охлажденіе достигаетъ линіи $a'B'c'$, рис. 68*A* (въ томъ случаѣ, когда металлъ слѣдуетъ діаграммѣ аустенитъ-графитъ), или чѣмъ еще бо́льшія крупинки первичнаго графита, образующіяся въ гипер-эвтектическомъ чугунѣ при охлажденіи въ области III (рис. 68*A*). Подобнаго рода грубый скелетъ изъ первичнаго и эвтектическаго графита необходимо долженъ сообщать большую хрупкость металлу, въ которомъ онъ заключенъ, какъ и всякій иной скелетъ, изъ посторонняго непрочнаго вещества.

Графитъ, образующійся въ твердомъ металлѣ въ области VII, не имѣетъ возможности сливаться въ крупинки, какъ графитъ, возникающій при переходѣ изъ расплавленнаго въ твердое состояніе; онъ остается въ видѣ мельчайшаго порошка.

Такой мелкораздробленный графитъ можетъ быть въ значительной степени удаленъ при помощи окисленія съ поверхности, въ особенности изъ внѣшняго слоя отливки; въ случаѣ большихъ

крупинокъ обыкновеннаго сѣраго чугуна это не представляется возможнымъ.

Отливки изъ ковкаго чугуна почти такъ же дешевы, какъ обыкновенныя чугунныя, не столько потому, что при этомъ избѣгается стоимость переработки въ сталь,—ибо на мѣсто стоимости переработки въ сталь здѣсь становится стоимость длительнаго процесса отжига, при которомъ изъ цементита образуется графитъ,—но потому, что болѣе низкая температура плавленія металла сильно уменьшаетъ расходы при отливкѣ. Въ то же время эти отливки лишены непрочности и хрупкости бѣлаго чугуна, вызываемыхъ большой пропорціей входящаго въ его составъ цементита, и непрочности и хрупкости обыкновеннаго сѣраго чугуна, вызываемыхъ въ немъ присутствіемъ большихъ крупинокъ графита.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

Правило фазъ.

230) Общія замѣчанія.—Что такое правило фазъ? Въ чемъ оно заключается и въ чемъ его важность для металлурга? На эти вопросы будетъ легче отвѣтить, если мы освѣжимъ въ памяти нѣкоторыя элементарныя положенія.

Мы видѣли, что горныя породы состоятъ изъ совершенно опредѣленныхъ и ясно различимыхъ кристаллическихъ индивидуумовъ, называемыхъ минералами; примѣромъ можетъ служить гранитъ, состоящій изъ слюды, кварца и полевого шпата. Точно также и сплавы въ твердомъ состояніи обыкновенно состоятъ изъ подобныхъ же кристаллическихъ индивидуумовъ, соотвѣтствующихъ минераламъ горныхъ породъ. Эти кристаллическіе индивидуумы, эти минералы въ одномъ случаѣ, и quasi-минералы въ другомъ, носятъ названіе «фазъ». Терминъ этотъ будетъ точнѣе опредѣленъ въ дальнѣйшемъ изложеніи. Правило фазъ и касается именно этихъ фазъ.

Далѣе мы видѣли, что микроскопическія составляющія сплава могутъ являться нормальными или ненормальными для данной температуры. Напримѣръ, мы видѣли, что нормальными составляющими медленно охлажденной стали являются ферритъ и цементитъ, частью свободные, частью образующіе quasi-эвтектическую механическую смѣсь, называемую перлитомъ. Мы видѣли также, что въ составъ быстро охлажденной съ температуры выше критическаго интервала стали, вмѣсто этихъ нор-

мальныхъ составляющихъ, входитъ главнымъ образомъ аустенитъ. Аустенитъ является ненормальнымъ для этой температуры; его существованіе нормально только при температурахъ въ критическомъ интервалѣ и выше. Будучи сохраненъ такимъ образомъ, онъ является ненормальнымъ, и въ этомъ смыслѣ быстро охлажденная сталь не находится въ состояніи молекулярнаго равновѣсія.

Правило фазъ даетъ намъ возможность анализировать и разрѣшать такіе вопросы, какъ 1) являются ли составляющія даннаго сплава нормальными при данныхъ условіяхъ, т. е. находится ли въ этомъ смыслѣ сплавъ въ молекулярномъ равновѣсіи; 2) каковы тѣ нормальныя, т. е. отвѣчающія равновѣсію, составляющія, которыя должны возникнуть при данномъ превращеніи или данномъ переходѣ изъ одного состоянія въ другое; 3) и много другихъ подобныхъ вопросовъ.

Правило фазъ указываетъ намъ на «степень свободы» сплава, разсматриваемаго, какъ система, т. е. указываетъ намъ, обладаетъ ли данное строеніе сплава такою степенью стойкости, чтобы оно могло перенести измѣненіе температуры или концентраціи. Вообще говоря, мы можемъ опредѣлить «степень свободы» путемъ сравненія 1) числа различныхъ «компонентовъ» или «составляющихъ», какъ свободные металлы (или металлоиды), присутствующихъ въ даномъ сплавѣ, съ 2) числомъ «фазъ», т. е. съ числомъ ясно различимыхъ минералогическихъ индивидуумовъ, «минераловъ» или quasi-минераловъ, присутствующихъ въ этомъ сплавѣ.

Такъ, напримѣръ, чистая углеродистая сталь содержитъ два компонента, желѣзо и углеродъ. Мы можемъ принять, что такая сталь, будучи закалена, состоитъ изъ трехъ ясно различимыхъ «минераловъ» или фазъ: 1) аустенита, въ значительной части сохранившагося подъ вліяніемъ быстраго охлажденія, нестойкаго при низкой температурѣ и стремящагося перейти обратно въ ферритъ и цементитъ; 2) небольшого количества феррита и 3) небольшого количества цементита, образовавшихся при превращеніи небольшого количества аустенита, несмотря на быстроту охлажденія. Въ общемъ, молекулярное равновѣсіе въ данномъ случаѣ является неустойчивымъ, потому что существуетъ стремленіе,—стремленіе очень сильное, хотя и сдерживаемое,—со стороны остальнаго аустенита перейти обратно въ ферритъ и цемен-

титъ. Здѣсь имѣются два компонента, но эти компоненты образуютъ три отдѣльныхъ фазы, находятся въ трехъ различныхъ состояніяхъ.

Ферритъ и цементитъ медленно охлажденной стали, съ другой стороны, являются нормальными для существующей температуры и служатъ примѣромъ стойкаго равновѣсія. При небольшомъ нагрѣваніи медленно охлажденной стали, или отожженой стали, ея «система» не подвергается измѣненію, т. е. она по прежнему остается образованной изъ феррита и цементита. Здѣсь такъ же, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, присутствуютъ два элемента, желѣзо и углеродъ, но эти два компонента образуютъ только двѣ фазы, ферритъ и цементитъ.

Строеніе или «система» отожженой стали, очевидно, болѣе устойчива, чѣмъ закаленной стали, потому что первая не измѣняется при слабомъ нагрѣваніи; иными словами, она можетъ, не измѣняясь, выдержать измѣненіе окружающихъ условій. На языкѣ правила фазъ, первая система обладаетъ большей «степенью свободы», чѣмъ вторая. Въ дальнѣйшемъ мы дадимъ всему этому болѣе точное опредѣленіе.

Мы знаемъ, что первая система болѣе устойчива, чѣмъ вторая. Но если бы мы этого и не знали, правило фазъ дало бы намъ указаніе, безъ того, чтобы мы были вынуждены прибѣгнуть къ прямому опыту. Въ случаѣ стали мы хорошо знаемъ относительную устойчивость различныхъ ея состояній, но во многихъ подобныхъ случаяхъ прямой опытъ можетъ и не дать указанія на то, которое изъ двухъ состояній болѣе устойчиво, и тогда мы можемъ оказаться въ полномъ невѣдѣніи относительно устойчивости, абсолютной или относительной, двухъ системъ. Здѣсь также на помощь является правило фазъ.

При сравненіи закаленной стали съ медленно охлажденной, правило фазъ въ своихъ выводахъ опирается на томъ, что 1) въ закаленной стали два компонента образуютъ три фазы, 2) тогда какъ въ медленно охлажденной стали тѣ же два компонента образуютъ только двѣ фазы. Въ дальнѣйшемъ это будетъ пояснено болѣе подробно.

231) Значеніе правила фазъ для металлурга заключается главнымъ образомъ въ томъ, что онъ можетъ имъ руководиться какъ при толкованіи извѣстныхъ явленій, такъ и при составленіи плана новыхъ изслѣдованій.

Когда изслѣдователь имѣетъ передъ собой рядъ фактовъ, не вполнѣ поддающихся объясненію, можетъ случиться, что, благодаря незнанію, онъ станетъ строить теоріи, представляющіяся ему возможными, и при помощи ихъ будетъ стараться объединить эти факты, а затѣмъ приступитъ къ опытной повѣркѣ своихъ теорій. Знаніе же правила фазъ дастъ ему возможность повѣрить свои теоріи и тотчасъ же отбросить многія изъ нихъ, а можетъ быть и всѣ, не производя прямыхъ опытовъ. Съ другой стороны, правило фазъ можетъ тотчасъ указать на тѣ опыты, которые дадутъ ему возможность быстро рѣшить, которая изъ двухъ теорій вѣрна.

Значеніе правила фазъ для начинающихъ изучать сплавы не такъ велико по достигнутымъ результатамъ, какъ по тѣмъ, которыхъ можно ожидать въ будущемъ отъ примѣненія его къ этому вопросу; въ особенности, если принять во вниманіе, какъ усиленно теперь занимаются его примѣненіемъ различные изслѣдователи. Правило фазъ примѣняется настолько дѣятельно, что даже въ такомъ элементарномъ трудѣ, какъ этотъ, не представляется возможнымъ миновать его, не сдѣлавъ попытки изложить, хотя въ общихъ чертахъ, его сущности.

Прежде чѣмъ приступить къ изложенію этого замѣчательнаго правила, займемся нѣсколько подробнѣе нѣкоторыми вопросами, въ особенности условіями равновѣсія и терминологіей правила фазъ.

232) Равновѣсіе. — Мы уже видѣли, что, несмотря на то, что большинство водныхъ растворовъ и расплавленныхъ сплавовъ представляютъ собою однородные растворы, напр. одного металла въ другомъ, углерода въ желѣзѣ и т. п., по замерзаніи они часто распадаются на такія ясно различимыя массы, какъ 1) твердые растворы (серебро въ золотѣ), 2) чистые металлы (мы это приняли въ случаѣ свинца и олова), 3) чистые металлоиды (графитъ въ чугунѣ), 4) опредѣленныя химическія соединенія (хлористый натрій, антимонидъ мѣди, алюминидъ золота). Далѣе мы видѣли, что такія молекулярныя перегруппировки происходятъ не только во время избирательнаго замерзанія, но также, какъ въ случаѣ соединеній желѣза съ углеродомъ, при превращеніяхъ въ твердой, но раскаленной до-красна пластичной массѣ металла. Какъ тѣ, такъ и другія молекулярныя перегруппировки, но въ особенности вяло идущія превращенія

въ твердомъ металлѣ, часто далеко не доходятъ до конца ко времени полнаго охлажденія металла, 1) потому что обычная скорость охлажденія можетъ оказаться слишкомъ большой для того, чтобы они успѣли завершиться, и 2) потому что, благодаря медленности диффузіи, двѣ составляющія, которыя вступили бы въ реакцію, находись онѣ въ непосредственномъ соприкосновеніи, могутъ оказаться изолированными одна отъ другой третьей составляющей. При достаточномъ времени для диффузіи, эти изолированныя составляющія достигли бы одна другой, прореагировали бы и привели бы систему въ состояніе молекулярнаго равновѣсія. Но разъ уже металлъ остылъ, то, что мы можемъ назвать молекулярной неподвижностью или молекулярной вязкостью, препятствуетъ этимъ превращеніямъ. Низкая температура, подобно тормазу, удерживаетъ атомы въ ненормальномъ и, въ этомъ смыслѣ, неустойчивомъ для даннаго температурнаго интервала, положеніи; при этомъ атомы стремятся принять молекулярную группировку, нормальную для существующей температуры, но встрѣчаютъ въ своемъ стремленіи препятствіе со стороны молекулярной неподвижности.

Такимъ образомъ, даже въ сравнительно медленно охлажденныхъ сплавахъ равновѣсіе можетъ быть очень несовершенно; твердые растворы могутъ быть сильно пересыщены (§ 96), и превращенія задержаны на извѣстной стадіи. Конечно, при очень быстромъ охлажденіи, какъ при закалкѣ стали (§ 199), должны получаться системы, находящіяся еще дальше отъ состоянія равновѣсія; такія системы должны обладать сильнымъ стремленіемъ къ молекулярнымъ перегруппировкамъ, къ превращенію.

При существованіи такого неудовлетвореннаго стремленія, достаточно даже небольшого нагрѣванія, чтобы ослабить тормозящее вліяніе, оказываемое молекулярной неподвижностью, чтобы задержанныя быстрымъ охлажденіемъ превращенія пошли дальше, и чтобы до извѣстной степени произошла перегруппировка атомовъ.

233) Примѣръ нестойкаго равновѣсія.—Примѣромъ послужитъ намъ отпускъ закаленной стали. Объ отпускѣ мы уже подробно говорили въ § 205, къ которому мы и отсылаемъ читателя.

Въ краткихъ чертахъ дѣло заключается въ слѣдующемъ. Выше критическаго интервала A_1 до A_3 сталь внезапно при-

ходитъ въ состоянiе аустенита, нормальное для этой температуры. Если сталь медленно охладить ниже критическаго интервала, она также внезапно придетъ въ состоянiе феррита и цементита,—состоянiе нормальное для болѣе низкихъ температуръ [1]).

При очень быстромъ охлажденiи стали съ температуры выше критическаго интервала до комнатной температуры, превращенiе аустенита въ ферритъ и цементитъ въ сильной степени задерживается, такъ что бóльшая часть металла остается въ состоянiи аустенита,—состоянiи ненормальномъ для низкой температуры. Это и есть закалка стали.

Если такую закаленную сталь слегка нагрѣть, даже только до 66° Ц., часть аустенита перейдетъ въ ферритъ и цементитъ, т. е. закалка будетъ слегка ослаблена, сталь будетъ слегка отпущена. Превращенiе, задержанное быстрымъ охлажденiемъ, происходитъ теперь до той степени, до которой это ему позволяетъ незначительное ослабленiе молекулярной неподвижности, вызываемое нагрѣванiемъ.

Слѣдуетъ въ особенности замѣтить, что ослабленiе тормозящаго влiянiя, оказываемаго молекулярной неподвижностью при такомъ нагрѣванiи, очень незначительно, такъ что задержанное превращенiе происходитъ только отчасти.

Если мы вновь обратимся къ сравненiю, приведенному въ § 207, то задержанное превращенiе будетъ согнутой пружиной, стремящейся выпрямиться, которой въ этомъ препятствуетъ тормазъ—низкая температура—приведенный въ дѣйствiе прежде, чѣмъ превращенiе успѣло закончиться. Ослабимъ нѣсколько тормазъ и пружина получитъ возможность начать выпрямляться; но уже съ самаго начала выпрямленiя пружина теряетъ часть своей упругости, и послѣдняя скоро падаетъ до точки, при которой уменьшеннаго сопротивленiя тормаза оказывается достаточно для того, чтобы задержать дальнѣйшее движенiе пружины. Равновѣсiе между пружиной и тормазомъ возстановлено, задер-

[1]) Osmond признаетъ ясно выраженныя переходныя стадiи превращенiя отъ аустенита къ ферриту и цементиту и обратно, и называетъ сталь въ этихъ стадiяхъ троститомъ и сорбитомъ. Не вдаваясь въ оцѣнку этой классификацiи, мы можемъ, для упрощенiя, принимать, что аустенитъ прямо переходитъ въ перлитъ и обратно («Contribution à l'Etude des Alliages» 1901, стр. 370).

жанное превращеніе не идетъ дальше. Нагрѣемъ сталь нѣсколько выше, т. е. ослабимъ еще нѣсколько тормазъ,—пружина опять начнетъ выпрямляться, ея упругость будетъ соотвѣтственно падать, и это будетъ продолжаться до тѣхъ поръ, пока треніе тормаза не окажется достаточнымъ, для того, чтобы задержать дальнѣйшее выпрямленіе. Превращеніе вновь задерживается.

Таково состояніе охлажденнаго сплава, представляющаго собой нестойкую систему.

234) Стойкое равновѣсіе.—Положимъ, съ другой стороны, что всѣ стремленія къ молекулярной перегруппировкѣ, къ превращенію, вполнѣ удовлетворены во время медленнаго охлажденія, такъ что молекулярное строеніе оказывается нормальнымъ для существующей температуры. Такая система должна находиться въ состояніи устойчиваго равновѣсія.

Нагрѣваніе такого сплава, или иной системы, не должно сопровождаться перегруппировкой и превращеніемъ по той простой причинѣ, что отсутствуетъ неудовлетворенное стремленіе къ перегруппировкѣ.

235) Дѣйствіе, оказываемое нагрѣваніемъ, служитъ критеріемъ устойчивости.—Въ случаѣ устойчиваго равновѣсія, строеніе, не измѣняется при нагрѣваніи, въ случаѣ неустойчиваго, измѣняется. Наоборотъ, если строеніе измѣнилось при нагрѣваніи, равновѣсіе не было устойчивымъ; если оно не измѣнилось, равновѣсіе было устойчивымъ.

Конечно, этотъ критерій приходится примѣнять съ большой осторожностью и знаніемъ. Такъ, напримѣръ, положимъ, что мы нагрѣемъ закаленную сталь до 320°; благодаря большей молекулярной подвижности при этой температурѣ, сталь до извѣстной степени отпустится, часть аустенита перейдетъ въ ферритъ и цементитъ. Если затѣмъ мы эту сталь охладимъ до комнатной температуры и потомъ вновь нагрѣемъ до 230°, то никакого дальнѣйшаго измѣненія въ ней не произойдетъ. Однако, намъ извѣстно, что металлъ все еще, главнымъ образомъ, состоитъ изъ аустенита, т. е. что равновѣсіе все еще неустойчиво. Тотъ фактъ, что нагрѣваніе до болѣе низкой температуры, чѣмъ та, до которой быстро охлажденный металлъ былъ нагрѣтъ передъ тѣмъ, не вызываетъ измѣненія въ строеніи, не служитъ доказательствомъ устойчиваго равновѣсія.

Наоборотъ, положимъ, что мы будемъ охлаждать сталь настолько медленно, что превращеніе аустенита въ ферритъ и цементитъ дойдетъ до конца, такъ что охлажденный металлъ будетъ находиться въ состояніи устойчиваго равновѣсія. Несмотря на это, когда при нагрѣваніи будетъ достигнута критическая температура Ac_1 (приблизительно PSP', рис. 68), начнется обратное превращеніе въ аустенитъ. Небольшое размышленіе показываетъ, что этотъ фактъ не служитъ доказательствомъ неустойчивости системы. Вода при 80° устойчива, она представляетъ собой устойчивую систему, если можно одно вещество называть системой. Тотъ фактъ, что при нагрѣваніи до 100° или охлажденіи до 0°, она теряетъ свою устойчивость и переходитъ въ паръ или ледъ, не составляетъ еще доказательства ея неустойчивости при 80°. Когда мы говоримъ, что она устойчива, мы разумѣемъ устойчивость въ извѣстномъ температурномъ интервалѣ. Этотъ интервалъ ограниченъ критическими точками, напримѣръ, 0° и 100° въ случаѣ воды; онъ можетъ быть въ одномъ случаѣ уже, въ другомъ шире, и температура системы можетъ быть ближе или дальше отъ одной или отъ обѣихъ его границъ.

Итакъ, если мы желаемъ узнать, является ли данная система, представляющая собою, напримѣръ, какой-либо сплавъ, нормальной для данной температуры, т. е. находящейся въ равновѣсіи, и если съ этой цѣлью мы прибѣгнемъ къ нагрѣванію, для того, чтобы убѣдиться, произойдетъ ли при этомъ какое-либо измѣненіе въ системѣ, то должны быть соблюдены слѣдующія условія: 1) нагрѣваніе должно быть доведено до болѣе высокой температуры, чѣмъ любая изъ температуръ, достигнутыхъ сплавомъ съ тѣхъ поръ, какъ онъ вступилъ въ тотъ температурный интервалъ, въ которомъ онъ находится; 2) нагрѣваніе не должно достигать критической температуры.

236) Обратимость и замедленіе.—Это приводитъ насъ къ вопросу объ обратимости.

Перемѣны состоянія, сопровождающія собою охлажденіе, происходятъ въ обратномъ порядкѣ при нагрѣваніи; то же самое можно сказать и относительно превращеній, происходящихъ при охлажденіи и не сопровождающихся перемѣной состоянія. Такъ, напримѣръ, положимъ, что мы будемъ при атмосферномъ давленіи постепенно охлаждать водяной паръ; при 100° онъ кон-

денсируется и образуетъ воду, а затѣмъ при 0° вода замерзнетъ и образуетъ ледъ. Если затѣмъ мы начнемъ повышать температуру, то ледъ растаетъ при 0° и возникшая при этомъ вода перейдетъ въ паръ при 100°. Перемѣны состоянія, происходящія при охлажденіи, при нагрѣваніи происходятъ въ обратномъ порядкѣ, при чемъ какъ при нагрѣваніи, такъ и при охлажденіи онѣ обыкновенно происходятъ при одной и той же температурѣ; какъ замерзаніе воды, такъ и таяніе льда происходятъ при 0°, какъ кипѣніе воды, такъ и конденсація ея паровъ при 100°.

Если мы будемъ охлаждать сталь, содержащую точно 0,9% углерода, скажемъ, съ 900°, то, по достиженіи температуры около 690°, она перейдетъ изъ состоянія аустенита въ состояніе феррита и цементита. Если по окончаніи этого превращенія мы ее нагрѣемъ, она перейдетъ обратно въ аустенитъ. Но температура Ar_1, при которой превращеніе происходитъ во время охлажденія, значительно ниже Ac_1,—температуры, при которой это превращеніе происходитъ обратно во время нагрѣванія. Обратное превращеніе идетъ при болѣе высокой температурѣ. Существованіе такой разницы между температурами превращенія ясно указываетъ на то, что превращеніе во время охлажденія не наступаетъ тотчасъ по достиженіи теоретической температуры, при которой оно должно начинаться, и что во время охлажденія происходитъ нѣчто въ родѣ переохлажденія. Несовпаденіе температуры обратнаго превращенія служитъ, слѣдовательно, указаніемъ на то, что при охлажденіи превращеніе испытываетъ замедленіе, и что во время этого замедленія металлъ находится въ ненормальномъ состояніи,—въ состояніи, не отвѣчающемъ равновѣсію.

Если превращенія, которыя должны нормальнымъ образомъ происходить при охлажденіи, въ дѣйствительности происходятъ, и охлажденный сплавъ находится въ состояніи молекулярнаго равновѣсія, то эти превращенія обратимы при нагрѣваніи. Если, однако, стремленіе къ даннымъ превращеніямъ не получаетъ полнаго удовлетворенія при охлажденіи, и охлажденный сплавъ не находится въ состояніи молекулярнаго равновѣсія, тогда превращенія при нагрѣваніи не представляютъ собой вполнѣ точнаго воспроизведенія въ обратномъ порядкѣ превращеній, происходящихъ при охлажденіи.

Положимъ, что мы имѣемъ сталь, содержащую точно 0,9% углерода; благодаря медленному охлажденію, она состоитъ изъ

феррита и цементита. Нагрѣемъ ее выше Ac_1, и она перейдетъ въ аустенитъ; охладимъ ее ниже Ar_1, и она будетъ стремиться перейти обратно въ ферритъ и цементитъ. Такимъ образомъ, при нагрѣваніи имѣется на лицо стремленіе перейти выше точки превращенія изъ нормальнаго для низкой температуры состоянія (ферритъ и цементитъ) въ нормальное для высокой температуры состояніе (аустенитъ). Наоборотъ, при охлажденіи ниже точки превращенія, существуетъ стремленіе перейти изъ нормальнаго для высокой температуры состоянія аустенита въ нормальное для низкой температуры состояніе феррита и цементита.

237) Закаленная сталь служитъ примѣромъ необратимости. Положимъ, что сталь находится при температурѣ выше точки превращенія Ac_1, слѣдовательно, состоитъ изъ аустенита. Положимъ, что мы поведемъ ея охлажденіе настолько быстро, что произойдетъ только 10% того превращенія, которое стремится произойти, какъ только температура опустится ниже Ar_1; для того, чтобы могла произойти остальная часть превращенія, температура далѣе уже оказывается слишкомъ низкой. Остальная часть, 90%, превращенія задержана, но сохраняетъ стремленіе произойти. Это пружина (рис. 71), задерживаемая тормазомъ— низкой температурой.

Далѣе, мы слегка освобождаемъ тормазъ, нагрѣвъ сталь до 230°, какъ при отпускѣ (образуется соломенно-желтаго цвѣта пленка окиси желѣза) и происходятъ новые 10% превращенія; въ общемъ, слѣдовательно, произошло 20% превращенія, и остаются 80%, удерживаемыхъ тормазомъ. Затѣмъ мы нагрѣемъ еще выше, какъ при отпускѣ до 300° (пленка окиси желѣза принимаетъ синій цвѣтъ), и еще больше освободимъ этимъ тормазъ; благодаря этому происходятъ, скажемъ, еще новые 15% превращенія, что въ общемъ уже составляетъ, слѣдовательно, 35% всего превращенія. Остается еще 65% задержаннаго превращенія съ сильнымъ стремленіемъ произойти, но этому препятствуетъ сопротивленіе, оказываемое тормазомъ. При дальнѣйшемъ нагрѣваніи, скажемъ, до 600°, мы, повидимому, совершенно уничтожаемъ это сопротивленіе, и происходятъ тѣ 65% превращенія, которые еще оставались задержанными при 300°. Превращеніе происходитъ на-цѣло. Сталь оказывается отожженой.

Если мы поднимемъ температуру еще нѣсколько выше, выше точки превращенія Ac_1, сталь перейдетъ изъ состоянія феррита

и цементита въ состояніе аустенита, произойдетъ обратное превращеніе.

Такимъ образомъ, мы имѣемъ здѣсь на лицо слѣдующія превращенія:

1) При быстромъ охлажденіи (закалкѣ) съ температуры выше Ar_1, происходятъ только 10% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой температуры къ низкой, 90% остаются задержанными (10% аустенита переходятъ въ ферритъ и цементитъ, 90% остаются въ видѣ аустенита);

2) при послѣдующемъ нагрѣваніи А) происходятъ, по достиженіи сперва 230° (отпускъ до желтой побѣжалости), затѣмъ 300° (отпускъ до синей побѣжалости) и наконецъ 600° (отжигъ), остальные 90% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой температуры къ низкой (остальной аустенитъ переходитъ въ ферритъ и цементитъ; при 600° аустенитъ исчезаетъ и вся масса переходитъ въ ферритъ и цементитъ). В) Когда температура поднимается выше Ac_1, на-цѣло происходитъ превращеніе, соотвѣтствующее переходу отъ низкой температуры къ высокой (весь ферритъ и цементитъ переходятъ въ аустенитъ).

Однимъ словомъ, при охлажденіи происходятъ 10% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой температуры къ низкой; при нагрѣваніи А) 90% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой температуры къ низкой, а затѣмъ В) 100% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ низкой температуры къ высокой.

Какъ видно, превращенія, происходящія здѣсь при нагрѣваніи, не представляютъ собой воспроизведенія въ обратномъ порядкѣ превращеній, происходящихъ при охлажденіи.

238) Почему необратимость указываетъ на отсутствіе равновѣсія.—Собственно, это совершенно ясно изъ вышеприведеннаго примѣра. Если охлажденіе идетъ слишкомъ быстро для того, чтобы превращеніе, соотвѣтствующее переходу отъ высокой температуры къ низкой, могло произойти на-цѣло, тогда превращеніе, происходящее при такомъ охлажденіи, представляетъ собой только начальную стадію нормальнаго превращенія, остальная же часть оказывается задержанной, благодаря молекулярной неподвижности.

Для того, чтобы превращенія, происходящія при послѣдующемъ нагрѣваніи такого быстро охлажденнаго вещества, вос-

производили въ обратномъ порядкѣ превращенія, происходящія при охлажденіи, необходимо, чтобы при этомъ въ обратномъ порядкѣ происходила только указанная начальная стадія превращенія. Вмѣсто этого, при нагрѣваніи прежде всего идетъ превращеніе, соотвѣтствующее переходу отъ высокой температуры къ низкой, потому, что нагрѣваніе уменьшаетъ молекулярную неподвижность, которой и вызывалась задержка превращенія.

Если при этомъ нагрѣваніе достигаетъ точки превращенія, то въ обратномъ порядкѣ происходитъ не только 10% превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой къ низкой, но все превращеніе до конца.

Если бы при нагрѣваніи можно было достичь абсолютно мгновенно температуры превращенія, если бы на это не требовалось времени, то при этой температурѣ въ обратномъ порядкѣ произошла бы только начальная стадія превращенія, соотвѣтствующаго переходу отъ высокой температуры къ низкой; въ этомъ случаѣ, превращеніе при нагрѣваніи было бы эквивалентно съ тѣмъ, которое произошло при быстромъ охлажденіи, несмотря на то, что закаленная сталь не находится въ состояніи равновѣсія.

Но такой мгновенный подъемъ температуры невозможенъ и даже едва ли мыслимъ. Подъемъ температуры отъ комнатной до температуры превращенія совершается въ теченіе извѣстнаго промежутка времени, хотя бы и очень короткаго, и въ этомъ температурномъ интервалѣ происходитъ задержанная часть превращенія, соотвѣтствующая переходу отъ высокой температуры къ низкой, а не начальная стадія того же превращенія въ обратномъ порядкѣ.

Такимъ образомъ, однимъ изъ критеріевъ того, что превращенія, нормальныя для охлажденія, дошли до конца, т. е. того, что сплавъ находится въ состояніи молекулярнаго равновѣсія, является полная обратимость при нагрѣваніи превращеній, происшедшихъ при охлажденіи.

Итакъ, сказать, что при охлажденіи сплавъ или иная система достигли молекулярной устойчивости, все равно, что сказать, что тѣ превращенія, которыя произошли при этомъ охлажденіи, обратимы. Равнымъ образомъ, сказать, что температуры превращенія при нагрѣваніи (т. е. во время подъема

температуры) выше, чѣмъ при охлажденіи, все равно, что сказать, что превращенія испытываютъ замедленіе, во время котораго система находится въ состояніи молекулярной неустойчивости; точно также, разъ температуры превращенія при нагрѣваніи и при охлажденіи одинаковы, это указываетъ на отсутствіе замедленія и на то, что превращенія происходятъ тотчасъ по достиженіи нормальныхъ для нихъ температуръ.

Терминологія правила фазъ.

239) Компонентъ и фаза.—Необходимо вполнѣ уяснить себѣ значеніе этихъ двухъ терминовъ. Позволяю себѣ сдѣлать попытку дать имъ опредѣленіе и пояснить ихъ при помощи нѣсколькихъ примѣровъ.

Согласно терминологіи правила фазъ, «компонентами» сплава или другой системы являются свободные элементы и тѣ соединенія, которыя неразложимы при разсматриваемыхъ условіяхъ, и такимъ образомъ играютъ роль элементовъ; тѣ соединенія, однимъ словомъ, которыя непосредственно участвуютъ въ равновѣсіи системы. Компонентами являются свободные элементы и тѣ соединенія, которыя эквивалентны въ этомъ смыслѣ элементамъ. Свинецъ и олово (элементы) являются компонентами сплава свинца съ оловомъ; желѣзо и углеродъ (элементы) компонентами стали; хлористый натрій и вода (химическія соединенія) компонентами водного раствора соли.

Компоненты могутъ переходить изъ одного физическаго состоянія (твердаго, жидкаго или газообразнаго) въ другое (вода замерзаетъ, кипитъ), а также взаимно различнымъ образомъ соединяться и растворяться; два компонента могутъ образовать растворъ или соединеніе (желѣзо и углеродъ, соединяясь, образуютъ аустенитъ или цементитъ) и, въ свою очередь, могутъ выдѣлиться въ свободномъ состояніи изъ соединенія или раствора (распаденіе цементита на графитъ и желѣзо). При образованіи, такія соединенія и растворы стремятся достигнуть однородности, и прежде чѣмъ послѣдняя будетъ достигнута, не можетъ наступить равновѣсія.

Всѣ эти однородные соединенія и растворы, а также свободные элементы и являются фазами, при чемъ каждое изъ различныхъ физическихъ состояній образуетъ отдѣльную фазу.

Такимъ образомъ, фазы—это «однородныя состоянія, безразлично, будь то свободное состояніе, состояніе раствора или соединенія, а также твердое, жидкое или газообразное, въ которыя присутствующіе компоненты переходятъ или группируются». Компоненты—это тѣ индивидуумы, взаимное отношеніе которыхъ мы изучаемъ; фазы, это тѣ состоянія, физическія или химическія, въ которыхъ эти компоненты находятся или въ которыя они переходятъ.

Обыкновенно фаза опредѣляется, какъ «химически и физически однородная масса или массы постоянной концентраціи, причемъ число фазъ въ системѣ равно числу различныхъ однородныхъ массъ или числу массъ съ различными концентраціями» [1]; компоненты же, какъ «вещества независимо перемѣнной концентраціи въ фазѣ или системѣ, подлежащей разсмотрѣнію» [2]. Эти опредѣленія, повидимому, очень точны, но не обладаютъ той ясностью, которая необходима при элементарномъ *изложеніи*.

240) Примѣры компонентовъ и фазъ. *А*. Компонентами являются элементы.—Если мы приложимъ эти опредѣленія къ металламъ и сплавамъ, то найдемъ, что расплавленное олово состоитъ изъ одного компонента, олова, и одной фазы, расплавленнаго олова. Во время замерзанія олова одновременно существуютъ двѣ фазы: 1) расплавленное олово и 2) твердое олово; это двѣ фазы одного компонента, олова. Строго говоря, существуетъ еще третья фаза, пары олова и обыкновенно атмосферный кислородъ и азотъ, но для упрощенія, видоизмѣнивъ соотвѣтствующимъ образомъ формулы, мы можемъ во всѣхъ случаяхъ не принимать паровъ во вниманіе.

Всѣ сплавы свинца съ оловомъ (§ 48) состоятъ изъ двухъ компонентовъ, свинца и олова. Если расплавленный сплавъ свинца и олова отвѣчаетъ эвтектическому составу и если допустить, что свинецъ и олово вполнѣ взаимно растворимы, т. е. что они образуютъ однородный растворъ, то имѣется только одна фаза, расплавленный растворъ. Когда этотъ сплавъ начнетъ затвердѣвать, образуя эвтектическую смѣсь изъ чередующихся пластинокъ свинца и олова, число фазъ будетъ равно тремъ,

---

[1]) W. D. Bancroft, «The Phase Rule», стр. 1, 1897.

[2]) W. D. Bancroft «The Phase Rule», стр. 1, 1897.

а именно: 1) расплавленный сплавъ, расплавленный растворъ, представляющій собой какъ бы минералогическій индивидуумъ, 2) пластинки твердаго свинца и 3) пластинки твердаго олова.

Въ сплавѣ цинка съ свинцомъ (§ 98) компонентовъ два, цинкъ и свинецъ. Если свинецъ и олово входятъ въ составъ сплава въ такой пропорціи, что они не вполнѣ растворяютъ другъ друга, но образуютъ эмульсію, механическую смѣсь двухъ насыщенныхъ растворовъ, 1) свинца, насыщеннаго цинкомъ и 2) цинка, насыщеннаго свинцомъ, то присутствуютъ двѣ фазы, именно эти насыщенные растворы.

Точно также и въ чистой стали, состоящей только изъ желѣза и углерода, эти два неизмѣняющіеся элемента являются компонентами, тогда какъ преходящее, подвергающееся разложенію, соединеніе, цементитъ, и преходящій растворъ, аустенитъ, суть фазы, равно какъ и газообразное, расплавленное и жидкое состоянія. Въ то время какъ температура, повышаясь, проходитъ черезъ критическій интервалъ или интервалъ превращенія, черезъ точку плавленія, точку кипѣнія и точку диссоціаціи и затѣмъ снова понижается, эти два неизмѣняющихся компонента, желѣзо и углеродъ, вступаютъ между собой въ разнообразное взаимодѣйствіе. Въ началѣ мы имѣемъ двѣ фазы, свободное желѣзо, ферритъ и карбидъ желѣза, цементитъ; въ критическомъ интервалѣ эти двѣ фазы переходятъ въ одну твердую фазу—твердый растворъ, аустенитъ; по достиженіи точки плавленія, эта твердая фаза переходитъ въ фазу расплавленнаго углеродистаго желѣза (расплавленный аустенитъ, если можно такъ выразиться?). По достиженіи точки кипѣнія эта фаза переходитъ (допустимъ это для примѣра) въ фазу газообразнаго углеродистаго желѣза; при еще болѣе высоко лежащей точкѣ диссоціаціи (сдѣлаемъ и это допущеніе) эта фаза переходитъ въ фазу газообразнаго свободнаго желѣза и свободнаго углерода.

При охлажденіи вновь идетъ соединеніе, конденсація, замерзаніе и превращеніе, и эти фазы переходятъ изъ одной въ другую въ обратномъ порядкѣ. Ферритъ и цементитъ, твердый аустенитъ, расплавленный аустенитъ (?), газообразный аустенитъ (?), газообразное свободное желѣзо и свободный углеродъ, допустимъ, что таковы тѣ послѣдовательныя фазы (нѣкоторыя изъ нихъ гипотетичны), черезъ которыя проходятъ неизмѣняющіеся компоненты, желѣзо и углеродъ.

Понятіе фаза тѣмъ и важно, что оно постоянно напоминаетъ намъ, что мы должны разсматривать такія системы, какъ результатъ перехода изъ какой-либо иной системы. Такъ, твердый гранитъ мы разсматриваемъ, имѣя въ виду, что онъ произошелъ изъ расплавленнаго состоянія или по крайней мѣрѣ метаморфическимъ путемъ; строеніе твердаго сплава обычно мы разсматриваемъ, какъ результатъ перехода его изъ расплавленнаго состоянія (См. § 2).

241) Примѣры, въ которыхъ компонентами являются химическія соединенія.—До сихъ поръ мы разсматривали системы, компонентами въ которыхъ являлись элементы. Сдѣлаемъ шагъ дальше и разсмотримъ нѣсколько системъ, въ которыхъ компонентами являются химическія соединенія; роль послѣднихъ одинакова съ элементами въ томъ отношеніи, что они неразложимы при принимаемыхъ условіяхъ.

Водный растворъ соли замороженъ и вновь расплавленъ. Здѣсь въ началѣ два компонента, хлористый натрій и вода, образуютъ одну жидкую фазу, жидкій растворъ. При замерзаніи эта жидкая фаза переходитъ въ двѣ твердыхъ фазы, твердый хлористый натрій и ледъ. При плавленіи эти фазы вновь переходятъ въ одну жидкую фазу, жидкій растворъ соли въ водѣ. Число фазъ въ данномъ случаѣ равно тремъ: 1) жидкій водный растворъ соли, 2) твердая соль и 3) ледъ. Но каковы же компоненты? Очевидно, вода и соль, которыя не разлагаются при данныхъ условіяхъ и образуютъ различныя фазы, подобно элементамъ олову и свинцу, свинцу и цинку, желѣзу и углероду въ вышеразсмотрѣнныхъ примѣрахъ. Въ данномъ случаѣ, очевидно, хлоръ, натрій, водородъ и кислородъ нельзя разсматривать, какъ компоненты. Они не вступаютъ непосредственно въ взаимодѣйствіе; каждый изъ нихъ связанъ съ другимъ элементомъ, напр., хлоръ съ натріемъ, и хлоръ уже не въ состояніи дѣйствовать, какъ таковой. Равновѣсіе устанавливается не непосредственно между этими элементами, но между водой и солью. Мы занимаемся изученіемъ взаимодѣйствія не между этими элементами, но между соединеніями, водой и солью. Поэтому эти соединенія, вода и соль, и являются компонентами.

Съ точки зрѣнія обычнаго опредѣленія, вода и соль обладаютъ «независимо перемѣнной концентраціей въ разсматриваемой фазѣ или системѣ», т. е. мы можемъ измѣнять концен-

трацію соли независимо отъ воды и наоборотъ. Мы можетъ увеличить или уменьшить (испареніемъ) количество воды и такимъ образомъ измѣнить степень концентраціи; но мы не въ состояніи удалить хлора, безъ того, чтобы вмѣстѣ съ нимъ не удалить и натрія, съ которымъ онъ связанъ, точно такъ же, какъ мы не можемъ удалить водорода, безъ того, чтобы не удалить связаннаго съ нимъ кислорода. Ни одинъ изъ этихъ четырехъ элементовъ не можетъ быть удаленъ изъ системы или введенъ въ нее независимо отъ элемента, съ которымъ онъ соединенъ, безъ того, чтобы при этомъ не получилась новая, совершенно иная система. Если бы мы удалили нѣкоторое количество натрія, то получили бы новую систему изъ трехъ компонентовъ, воды, соли и свободнаго хлора, оставшагося по удаленіи части натрія.

Въ типичномъ гранитѣ, состоящемъ изъ мусковита (каліевая слюда), кварца и ортоклазоваго (каліеваго) полевого шпата, 1) число фазъ равно тремъ, такъ какъ каждый изъ названныхъ минераловъ составляетъ фазу, и 2) число компонентовъ также равно тремъ, именно: кремнекислота, окись аллюминія и окись калія. Правда, принимая, что всѣ эти минералы совершенно чисты, число присутствующихъ элементовъ равно четыремъ, кремній, алюминій, калій и кислородъ. Но въ цѣляхъ изученія равновѣсія намъ нѣтъ надобности принимать во вниманіе числа элементовъ.

Совершенно достаточно сосредоточить вниманіе на числѣ фазъ и компонентовъ, потому что, если мы расплавимъ гранитъ и вновь его охладимъ, станемъ нагрѣвать его и вновь охлаждать въ различныхъ температурныхъ интервалахъ, эти три компонента, три указанныхъ окиси, могутъ группироваться различнымъ образомъ, но ни одинъ изъ нихъ не разложится. Поскольку это касается равновѣсія, данныя окиси можно разсматривать, какъ элементы.

То же самое можно сказать и относительно системы, состоящей изъ мѣднаго купороса и воды. Растворимъ мѣдный купоросъ, содержащій кристаллизаціонную воду, въ водѣ, затѣмъ выкристаллизуемъ его, обезводимъ, затѣмъ вновь гидратируемъ и растворимъ;—при всѣхъ этихъ операціяхъ неизмѣняющимися индивидуумами являются безводный мѣдный купоросъ и вода. Слѣдовательно, они и представляютъ собой компоненты. Комбинируясь различнымъ образомъ, они и образуютъ фазы—безвод-

ную соль, твердый кристаллогидратъ и растворы различной концентраціи. Правда, и въ данномъ случаѣ присутствуютъ три элемента, мѣдь, сѣра и кислородъ, но это не играетъ никакой роли, потому что ни мѣдный купоросъ, ни вода не разлагаются при тѣхъ температурахъ, которыя здѣсь имѣются въ виду. Ни одинъ изъ этихъ трехъ элементовъ непосредственно не вступаетъ въ какую-либо реакцію, не испытываетъ перемѣны состоянія или концентраціи и не вліяетъ на равновѣсіе системы. Точно также, мы не можемъ измѣнить количество одного изъ этихъ элементовъ, независимо отъ другихъ. Иначе говоря, мы не въ состояніи удалить изъ системы части кислорода безъ того, чтобы не удалить одновременно водорода или мѣди и сѣры, съ которыми этотъ кислородъ соединенъ.

242) Аллотропическія водоизмѣненія представляютъ собой отдѣльныя фазы.—Каждое аллотропическое видоизмѣненіе даннаго элемента представляетъ собой отдѣльную фазу.

Если бы въ системѣ мы имѣли одновременно на лицо алмазъ, графитъ и аморфный углеродъ, они образовали бы три отдѣльныхъ фазы, потому что смѣсь различныхъ аллотропическихъ водоизмѣненій, кристалловъ различной формы, нельзя назвать «химически и физически однородной».

243) Сложная эвтектика не представляетъ собой фазы.—Хотя медленно охлажденная сталь съ 0,90% углерода состоитъ только изъ перлита, однако въ составъ ея входятъ двѣ фазы, ферритъ и цементитъ, изъ которыхъ образованъ перлитъ. Такъ какъ перлитъ неоднороденъ и состоитъ изъ механической смѣси двухъ веществъ, то онъ и не образуетъ отдѣльной фазы, потому что путемъ механическаго смѣшенія нельзя образовать фазы. Поэтому-то, хотя медленно охлажденная гипо-эвтектоидная сталь и состоитъ изъ перлита и феррита, однако она содержитъ только двѣ фазы, ферритъ и цементитъ; ибо тотъ фактъ, что часть феррита механически смѣшана съ цементитомъ и образуетъ перлитъ, не вліяетъ на число присутствующихъ фазъ.

244) Однородность фазъ.—Уже было указано, что каждая фаза должна быть однородна. Коснемся этого вопроса нѣсколько полнѣе. Масло, плавающее на водѣ или смѣшанное съ водой въ видѣ эмульсіи, это типичная двухфазная система. Однородный растворъ соли въ водѣ, это однофазная система. Но что же представляетъ собой неоднородный растворъ, все равно, жидкій или твердый? Образуетъ ли онъ фазу или нѣтъ?

На этотъ вопросъ можно отвѣтить двоякимъ образомъ. Во-первыхъ, правило фазъ касается только равновѣсныхъ системъ. Очевидно, что система, содержащая неоднородный растворъ, не можетъ быть въ равновѣсіи, потому что у этого раствора должно быть неудовлетворенное стремленіе къ диффузіи, къ тому, чтобы сгладить эту неоднородность. Такимъ образомъ, не представляется необходимости прибѣгать къ правилу фазъ для рѣшенія вопроса относительно равновѣсія такой системы.

Во-вторыхъ, неоднородный растворъ, собственно, заключаетъ въ себѣ безконечное число фазъ, потому что каждая степень концентраціи представляетъ собой отдѣльную фазу. Тѣмъ не менѣе, какъ мы увидимъ, правило фазъ, въ приложеніи къ такимъ системамъ, указываетъ, что онѣ неустойчивы.

245) Физическія условія. — При пространномъ изложеніи этого предмета было бы необходимо разсмотрѣть вліяніе, оказываемое какъ измѣненіемъ температуры, такъ и давленія. Цѣль, которую преслѣдуетъ настоящее изложеніе, позволяетъ ввести въ него упрощеніе, принявъ давленіе постояннымъ, и одну только температуру перемѣнной; мы будемъ придерживаться этого въ остальной части данной главы.

246) Независимо измѣняющіяся условія. — При изученіи равновѣсія системы и вліянія, оказываемаго измѣненіемъ условій на это равновѣсіе, мы должны имѣть въ виду два изъ измѣняющихся условій: измѣненія температуры и измѣненія степени концентраціи любого изъ присутствующихъ растворовъ, независимо отъ того, твердые ли эти растворы или жидкіе.

247) Произвольныя и согласованныя измѣненія условій. — Замѣтимъ, что температура и концентрація могутъ измѣняться въ соотвѣтствіи одна съ другой или произвольно, т. е. независимо одна отъ другой.

Положимъ, напримѣръ, что мы имѣемъ насыщенный растворъ соли въ водѣ при 20°. Если мы охладимъ этотъ растворъ до 10°, онъ станетъ пересыщеннымъ, потому что растворимость соли въ водѣ при 10° менѣе, чѣмъ при 20°; благодаря этому, избытокъ соли выкристаллизовывается, и вновь устанавливается равновѣсіе. При этомъ однофазная система, растворъ соли, переходитъ въ двуфазную систему—растворъ соли и твердая соль. Это измѣненіе температуры было произвольнымъ, потому что для компенсаціи его ничего не было предпринято.

Предположимъ теперь, что при охлажденіи раствора до 10° мы прибавимъ къ нему столько чистой воды, также имѣющей температуру 10°, что мы разбавимъ его до точки насыщенія, соотвѣтствующей 10°. При этомъ соль не будетъ выкристаллизовываться, потому что мы измѣнимъ вторую перемѣнную, концентрацію, соотвѣтственно съ первой, температурой.

Система выдержала одновременное измѣненіе обѣихъ перемѣнныхъ. Въ первомъ случаѣ измѣненіе температуры было произвольнымъ; во второмъ мы имѣли измѣненіе обѣихъ перемѣнныхъ.

Но если бы при охлажденіи до 10° мы прилили только половину того количества воды, которое мы прилили въ предыдущемъ случаѣ, произошла бы выкристаллизація соли, потому что прилитой воды было бы недостаточно для того, чтобы предотвратить пересыщеніе, вызываемое пониженіемъ температуры. Въ этомъ случаѣ, измѣненіе обѣихъ перемѣнныхъ было бы произвольнымъ, а не согласованнымъ.

248) Степень свободы. Правило фазъ. — Степень свободы данной системы, указываетъ на то, можетъ ли эта система, не нарушаясь и не переходя въ другую систему, выдержать произвольное измѣненіе только одной изъ этихъ двухъ перемѣнныхъ, температуры и концентраціи, или обѣихъ одновременно. Мы преднамѣренно, для упрощенія, игнорируемъ измѣненіе давленія, а также и присутствіе пара.

Степень свободы обозначается терминами нонваріантная или инваріантная, моноваріантная и диваріантная система.

Инваріантная или нонваріантная система представляетъ собой систему которая не можетъ выдержать измѣненія ни температуры, ни концентраціи (т. е. одного изъ перемѣнныхъ условій); систему, которая нарушается и переходитъ въ другую систему при измѣненіи одного изъ условій. Такое нарушеніе системы, *подъ вліяніемъ измѣненія одного изъ условій*, не можетъ быть предотвращено соотвѣтственнымъ измѣненіемъ другого условія.

Моноваріантная система представляетъ собой систему, которая можетъ выдержать измѣненіе температуры или концентраціи, если измѣненіе одного изъ этихъ условій сопровождается соотвѣтственнымъ измѣненіемъ другого. Моноваріантная система не въ состояніи выдержать одновременнаго произвольнаго измѣненія какъ температуры, такъ и концентраціи.

Диваріантная система представляетъ собой систему, которая можетъ выдержать одновременное произвольное измѣненіе какъ температуры, такъ и концентраціи.

Степень свободы нонваріантной системы равна 0, моноваріантной 1, диваріантной 2.

Мы можемъ узнать степень свободы любой данной системы, или, другими словами, мы можемъ узнать, нонваріанта она, моноваріантна или диваріантна по формулѣ [1]).

$$L = n + 1 - r,$$

$L =$ степени свободы: { 0 для нонваріантной системы, 1 » моноваріантной », 2 » диваріантной »

$n =$ числу компонентовъ.

$r =$ числу фазъ.

Эта формула и представляетъ собой правило фазъ.

249) Примѣры на правило фазъ.—Приводимые ниже примѣры послужатъ намъ какъ для поясненія, такъ и для повѣрки

---

[1]) Данная формула, выражающая собой правило фазъ, игнорируетъ преднамѣренно не только всегда присутствующую газообразную фазу, но и измѣненія давленія. При болѣе широкомъ изложеніи необходимо принимать во вниманіе какъ газообразную фазу, такъ и измѣненія давленія, и тогда формула получаетъ слѣдующій видъ:

$$L = n + p - r,$$

гдѣ $p =$ числу перемѣнныхъ (температура и давленіе). Здѣсь, равнымъ образомъ, $L = 0$ для нонваріантной системы, 1 для моноваріантной и 2 для диваріантной. Или, какъ иногда говорятъ:

въ нонваріантной системѣ число фазъ $= n + 2$
» моноваріантной » » » $= n + 1$
» диваріантной » » » $= n$

Во всякомъ случаѣ, какъ указанная въ этомъ примѣчаніи формула, такъ и указанная въ текстѣ приводятъ къ одному результату. Такъ, смѣсь льда и воды по обѣимъ формуламъ представляетъ собой нонваріантную систему. То, что она нонваріантна по формулѣ, приведенной въ текстѣ $L = n + 1 - r$, показано въ § 249; то, что она нонваріантна по болѣе общей формулѣ, приведенной въ примѣчаніи, можно легко показать. Число компонентовъ равно 1,—вода; число фазъ равно 3,—ледъ, вода и паръ, т. е. паръ надъ смѣсью льда и воды; число перемѣнныхъ равно 2,—температура и давленіе. Отсюда,

$$L = 1 + 2 - 3 = 0.$$

Таблица 14.

Сводка примѣровъ на правило фазъ, разобранныхъ въ §§ 249—256.

Система.	Элементы.	Компоненты.	Фазы.	Индивидуумы, не являющіеся фазами.	Степень свободы.
Замерзающее олово.	*Sn*	*Sn*	Расплавленное олово, твердое олово.		Нонваріантная.
Замерзающая вода.	*H,O*	H_2O	Жидкая вода, ледъ.		Нонваріантная.
Растворъ соли выше точки замерзанія.	*Na,Cl, H,O*	*NaCl* H_2O	Жидкій растворъ.		Диваріантная.
Замерзшій растворъ соли.	*Na,Cl, H,O*	*NaCl* H_2O	Соль, ледъ.	Эвтектика изъ соли и льда.	Моноваріантная.
Сплавъ свинца съ оловомъ, расплавленный.	*Sn,Pb*	*Sn,Pb*	Расплавленный растворъ.		Диваріантная.
Сплавъ свинца съ оловомъ, твердый.	*Sn,Pb*	*Sn,Pb*	Твердый свинецъ, твердое олово.	Эвтектика изъ свинца и олова.	Моноваріантная.
То же, во время избирательнаго замерзанія.	*Sn,Pb*	*Sn,Pb*	Твердый свинецъ, расплавленный растворъ.		Моноваріантная.
То же, во время замерзанія эвтектики.	*Sn,Pb*	*Sn,Pb*	Твердый свинецъ, твердое олово, расплавленный растворъ.	Эвтектика изъ свинца и олова.	Нонваріантная.
Расплавленная сталь съ 0,50% углерода.	*Fe,C*	*Fe,C*	Расплавленный растворъ.		Диваріантная.
То же, при 1.300°, твердая.	*Fe,C*	*Fe,C*	Твердый растворъ (аустенитъ).		Диваріантная.

Система.	Элементы.	Компоненты.	Фазы.	Индивидуумы, не являющіеся фазами.	Степень свободы.
То же, при 720°, S'' (рис. 68).	Fe,C	Fe,C	1) аустенитъ 2) ферритъ		Моноваріантная.
То же, при 690° h^{IV} рекалесценція.	Fe,C	Fe,C	1) аустенитъ 2) ферритъ 3) цементитъ	Перлитъ (эвтектоидъ изъ феррита и цементита).	Нонваріантная.
То же, при комнатной температурѣ послѣ закалки выше Ar_1.	Fe,C	Fe,C	1) аустенитъ 2) ферритъ 3) цементитъ	Перлитъ въ маломъ количествѣ.	Нонваріантная.
То же, при комнатной температурѣ медленно охлажденная-отожженая.	Fe,C	Fe,C	1) ферритъ 2) цементитъ	Перлитъ.	Моноваріантная.
Сѣрый чугунъ при комнатной температурѣ.	Fe,C	Fe,C	1) ферритъ 2) цементитъ 3) графитъ	Перлитъ.	Нонваріантная.
Закаленный бѣлый чугунъ.	Fe,C	Fe,C	1) ферритъ 2) цементитъ 3) графитъ 4) аустенитъ	Перлитъ.	Нонваріантная.

правила фазъ. Въ каждомъ случаѣ мы прежде всего опредѣлимъ ту степень свободы, которой на основаніи правила фазъ должна обладать разсматриваемая система: т. е. нонваріантна ли данная система, моноваріантна или диваріантна. Затѣмъ, опредѣливъ, напримѣръ, что данная система моноваріантна, разсмотримъ тѣ условія, при которыхъ она находится, и на основаніи ихъ постараемся убѣдиться, дѣйствительно ли она моноваріантна. Короче говоря, испытаемъ справедливость правила фазъ, разсмотрѣвъ нѣсколько различныхъ системъ.

Для большаго удобства при справкахъ, элементы, фазы, компоненты и степень свободы разсматриваемыхъ здѣсь системъ приведены въ сжатой формѣ въ таблицѣ 14.

250) Олово во время замерзанія,—положимъ въ стадіи, представленной точкой C, рис. 14. Здѣсь одновременно существуютъ расплавленное олово и твердое олово, и каждое изъ нихъ представляетъ собой отдѣльную фазу. Поэтому получается уравненіе

$$\text{Степень свободы} = \text{числу компонентовъ} + 1 - \text{число фазъ}.$$
$$L \quad = \quad 1 \quad + 1 - 2 = 0.$$

Слѣдовательно, система нонваріантна.

Посмотримъ, такъ ли это на самомъ дѣлѣ.

Во-первыхъ, никакое измѣненіе состава невозможно, ибо химическій составъ обѣихъ фазъ одинаковъ. Диффузія изъ одной фазы, расплавленнаго олова, въ другую, твердое олово, не можетъ измѣнить состава ни той, ни другой изъ фазъ.

Разсматривая съ другой точки зрѣнія, всякое измѣненіе въ составѣ должно повести къ переходу этой системы въ другую систему. Если бы мы прибавили вещество, растворимое въ оловѣ, мы получили бы новую систему, потому что мы тѣмъ самымъ замѣнили бы чистый металлъ твердымъ растворомъ. Если бы мы прибавили нерастворимое въ оловѣ вещество, оно образовало бы отдѣльную фазу, и двуфазная система перешла бы въ трехфазную. Такимъ образомъ, единственно возможное измѣненіе, это измѣненіе температуры. Если мы будемъ нагрѣвать систему, часть твердаго олова расплавится, при чемъ температура будетъ оставаться постоянной до тѣхъ поръ, пока все твердое олово не расплавится. До тѣхъ поръ, пока температура остается постоянной, система не измѣняется, потому что измѣненіе количественнаго соотношенія между двумя различными членами системы нельзя считать измѣненіемъ системы. Правило фазъ имѣетъ качественный характеръ. Но прежде чѣмъ мы будемъ въ состояніи поднять температуру выше точки плавленія, все олово должно расплавиться, т. е. при повышеніи температуры система нарушается, благодаря тому, что совершенно исчезаетъ одна изъ ея фазъ, твердое олово, и она переходитъ изъ двуфазной въ однофазную систему. Точно также, если мы будемъ отнимать тепло, положимъ, обложивъ льдомъ сосудъ, въ которомъ находится замерзающее олово, температура будетъ оставаться постоянной до тѣхъ поръ, пока все олово не замерзнетъ, измѣненія температуры не произойдетъ до тѣхъ

поръ, пока система не нарушится вслѣдствіе полнаго исчезновенія одной изъ ея фазъ, расплавленнаго олова, и не перейдетъ изъ двуфазной въ однофазную систему.

Однимъ словомъ, система нарушается при измѣненіи единственнаго перемѣннаго условія, температуры. Слѣдовательно, система нонваріантна. Правило фазъ въ этомъ случаѣ оказывается справедливымъ.

251) Вода во время замерзанія точно также состоитъ изъ одного компонента, неразложимаго, въ нашихъ условіяхъ, и образующаго двѣ фазы, вода и ледъ. Такимъ образомъ, $L = 1 + 1 - 2 = 0$, т. е. система нонваріантна, какъ и въ предыдущемъ случаѣ. Никакое измѣненіе температуры невозможно до тѣхъ поръ, пока или весь ледъ, или вся вода не исчезнутъ, перейдя въ другую фазу (т. е. пока весь ледъ не растаетъ и не перейдетъ въ воду, или вся вода не замерзнетъ и не перейдетъ въ ледъ), и система не превратится изъ двуфазной въ однофазную. Правило фазъ оказывается справедливымъ и въ этомъ случаѣ.

252) Растворъ соли въ водѣ выше точки замерзанія.— Компонентовъ два, соль и вода; фазъ одна, жидкій растворъ; $L = 2 + 1 - 1 = 2$, система диваріантна. Посмотримъ, дѣйствительно ли она диваріантна.

Положимъ, что степень концентраціи раствора и температура выражаются точкой D, рис. 27. Очевидно, что жидкій растворъ останется жидкимъ растворомъ, т. е. система останется однофазной, если, не измѣняя состава, мы произвольно понизимъ температуру до f, положимъ, окруживъ сосудъ, содержащій растворъ, льдомъ; или если, не измѣняя температуры, мы измѣнимъ составъ до f', приливъ воды; или если мы, одновременно разбавивъ и охладивъ растворъ, придадимъ ему температуру и составъ f''. Однимъ словомъ, система остается однофазной, т. е. не нарушается даже въ томъ случаѣ, если произвольно измѣнить оба перемѣнныхъ условія, температуру и степень концентраціи, не принимая въ расчетъ при измѣненіи одного условія измѣненія другого. Такимъ образомъ, система диваріантна.

253) Соль-ледъ.—Допустимъ для упрощенія, какъ и раньше, что соль и ледъ взаимно абсолютно нерастворимы. Въ такомъ случаѣ замерзшій растворъ соли, составъ и температура котораго e, долженъ представлять собой конгломератъ изъ 1) избытна

чистаго льда сверхъ эвтектической пропорціи, 76,4°/о воды, 23,6°/о соли, и 2) изъ эвтектики, состоящей изъ чередующихся пластинокъ чистаго льда и чистой соли. Въ данномъ случаѣ, мы имѣемъ два компонента (соль и вода) и двѣ фазы, 1) чистый ледъ и 2) чистая соль. $L = 2 + 1 - 2 = 1$, система моноваріантна. Посмотримъ, такъ ли это на самомъ дѣлѣ.

Въ данномъ случаѣ не приходится задаваться вопросомъ, въ состояніи ли система выдержать измѣненіе концентраціи, по той простой причинѣ, что никакое измѣненіе немыслимо вслѣдствіе сдѣланнаго нами допущенія, что твердая соль и ледъ взаимно абсолютно нерастворимы. Единственное измѣненіе, такимъ образомъ, которое остается разсмотрѣть, это измѣненіе температуры. Очевидно, если нагрѣвать конгломератъ изъ кристалловъ соли и кристалловъ льда (конечно, при этомъ температура не должна достигнуть точки плавленія эвтектики), никакого измѣненія не наступитъ. Система не нарушается при измѣненіи температуры. Слѣдовательно, мы доказали, что она моноваріантна.

Все, что говорилось о системахъ соль-вода и соль-ледъ, приложимо и къ системамъ расплавленный сплавъ свинца съ оловомъ и твердый сплавъ свинца съ оловомъ.

254) Сплавъ свинца съ оловомъ во время избирательнаго замерзанія.—Разсмотримъ сплавъ, содержащій 45°/о олова и 55°/о свинца. Положимъ, что, начиная съ 350° (точка *G*, рис. 24), онъ охладился до 212° (точка *L'*); такимъ образомъ отъ *H* до *L'* шло избирательное замерзаніе.

Во время этого замерзанія кристаллы избыточнаго свинца выдѣляются изъ маточнаго металла, и послѣдній, благодаря этому, обогащается оловомъ; въ точкѣ *L'* маточный металлъ имѣетъ составъ *M'*, или 56°/о олова и 44°/о свинца, ибо въ каждый данный моментъ избирательнаго замерзанія составъ маточнаго металла отвѣчаетъ нормально тому составу, для котораго существующая температура является точкой замерзанія.

Здѣсь мы имѣемъ два компонента, свинецъ и олово, и двѣ фазы, твердый свинецъ и расплавленный растворъ, содержащій 56°/о олова, растворениаго въ 44°/о свинца. Уравненіе имѣетъ видъ $L = 2 + 1 - 2 = 1$. Система моноваріантна. Посмотримъ, дѣйствительно ли она моноваріантна.

Составъ твердаго свинца не можетъ измѣняться, такъ какъ мы приняли, что свинецъ и олово взаимно абсолютно нераство-

римы; концентрація же расплавленнаго раствора олова въ свинцѣ можетъ измѣняться.

Прежде всего посмотримъ, что̀ произойдетъ, если понизить температуру на 12°, до точки N'. Выдѣлится вновь небольшое количество свинца, и маточный металлъ обогатится до 60% олова (точка Q), но фазы останутся тѣ же, что̀ и раньше, твердый свинецъ и расплавленный растворъ олова въ свинцѣ. Короче говоря, система не нарушится, потому что измѣненіе концентраціи раствора нельзя считать за измѣненіе системы, какъ таковой. Конечно, растворъ, вслѣдствіе измѣненія концентраціи, можно было бы назвать новой фазой, но для нашихъ цѣлей эта новая фаза эквивалентна съ прежней, которую она замѣщаетъ.

Но что же обозначаетъ это измѣненіе концентраціи? Не измѣнились ли одновременно оба условія, температура и концентрація, безъ нарушенія системы, и не является ли система диваріантной, вопреки правилу фазъ? Конечно, нѣтъ, ибо измѣненіе концентраціи не произвольно,—оно соотвѣтствуетъ измѣненію температуры. Такимъ образомъ, произвольно было измѣнено только одно условіе.

Очевидно, измѣненіе концентраціи и было причиной того, что система не нарушилась и не перешла изъ системы 1) твердый свинецъ, 2) расплавленный растворъ олова въ свинцѣ, въ систему 1) твердый свинецъ—2) твердое олово. Ибо, если бы какимъ бы ни было образомъ удалось предотвратить измѣненіе концентраціи, такъ что по достиженіи температуры 200° маточный металлъ содержалъ бы, какъ при 212°, 56% олова и 44% свинца, такой маточный металлъ долженъ былъ бы замерзнуть, потому что температура 200°, на 12° ниже точки замерзанія (212°) такого сплава. Если концентрація не измѣняется соотвѣтственно съ измѣненіемъ температуры, это равносильно произвольному измѣненію концентраціи.

До сихъ поръ мы разсматривали измѣненія температуры и нашли, что система моноваріантна, т. е. что она не нарушается при измѣненіи температуры, конечно, если при этомъ соотвѣтственно измѣняется концентрація; произвольное же измѣненіе концентраціи ведетъ къ нарушенію системы. Перейдемъ теперь къ разсмотрѣнію измѣненій въ концентраціи.

Положимъ, что система находится при 212° и образована, слѣдовательно, изъ твердаго свинца и расплавленнаго маточнаго

металла, составъ котораго M', т. е. 56% олова и 44% свинца. Далѣе, положимъ, что мы измѣнимъ концентрацію расплавленнаго маточнаго металла отъ M' до S, напримѣръ, приливъ достаточное количество расплавленнаго сплава, находящагося также при 212° и содержащаго 70% олова и 30% свинца. Если мы одновременно измѣнимъ соотвѣтственнымъ образомъ температуру, т. е. если, охлаждая извнѣ, мы одновременно понизимъ температуру съ S до Q, съ 212° до 200°, то система не измѣнится; въ сущности, мы это и сдѣлали въ предыдущемъ случаѣ. Но что произойдетъ, если, не измѣняя температуры, мы измѣнимъ концентрацію маточнаго металла, сливъ его и замѣнивъ другой порціей расплавленнаго металла, имѣющаго температуру 212°?

Содержаніе свинца въ такомъ расплавленномъ металлѣ при 212° не можетъ правышать содержанія свинца въ только что слитомъ маточномъ металлѣ, т. е. 44%, ибо существующая температура, 212°, ниже точки плавленія любого сплава свинца съ оловомъ, содержаніе свинца въ которомъ болѣе 44%. Такимъ образомъ, если бы мы прибавили сплавъ съ болѣе чѣмъ 44% свинца, такой сплавъ былъ бы твердымъ и состоялъ изъ чередующихся пластинокъ свинца и олова. Слѣдовательно, мы получили бы систему 1) твердый свинецъ (образовавшійся при первоначальномъ охлажденіи до 212° и заключающійся въ прибавленномъ сплавѣ), и 2) твердое олово. Эта система была бы совершенно отлична отъ той, которую мы стремились образовать, именно 1) твердый свинецъ и 2) расплавленный растворъ, въ составъ котораго входило бы менѣе 56% олова и болѣе, чѣмъ 44% свинца.

Въ виду того, что не представляется возможнымъ смѣстить концентрацію расплавленной фазы въ сторону бо̀льшаго содержанія свинца, попробуемъ смѣстить ее въ сторону бо̀льшаго содержанія олова. Положимъ, что для этого мы сольемъ маточный металлъ, содержащій 44% олова, и замѣстимъ его новой порціей расплавленнаго сплава состава R, съ 65% олова. Очевидно, что твердый свинецъ тотчасъ началъ бы растворяться въ этомъ расплавленномъ сплавѣ, и это продолжалось бы до тѣхъ поръ, пока процентное содержаніе олова въ послѣднемъ не упало бы ниже 56%.

Въ § 21 было уже указано то общее условіе, которое опредѣляетъ, будетъ ли твердый металлъ растворяться въ распла-

вленномъ металлѣ, съ которымъ онъ находится въ соприкосновеніи.

Твердый металлъ будетъ растворяться въ расплавленномъ металлѣ, если образующійся при этомъ сплавъ будетъ достаточно плавокъ, чтобы оставаться въ расплавленномъ состояніи при существующей температурѣ.

Но положимъ, что мы вновь сольемъ этотъ расплавленный металлъ и опять прибавимъ нѣкоторое количество расплавленнаго сплава, содержащаго 65% олова и 35% свинца. Свинецъ вновь будетъ растворяться, и это будетъ опять-таки продолжаться до тѣхъ поръ, пока содержаніе олова въ расплавленной части не понизится до 56%. Такимъ образомъ, наши попытки удержать при этой температурѣ твердый свинецъ въ соприкосновеніи съ расплавленнымъ металломъ, содержащимъ болѣе 56% олова, не имѣютъ успѣха. Очевидно, сколько бы разъ мы ни замѣняли расплавленнаго металла новымъ, содержаніе олова въ немъ всегда будетъ понижаться до 56%, вслѣдствіе растворенія твердаго свинца, и это будетъ продолжаться, покуда послѣдній нацѣло не растворится; иначе говоря, покуда система не нарушится, вслѣдствіе исчезновенія одной изъ фазъ, твердаго свинца.

Ясно, что результатъ былъ бы тотъ же самый, если бы вмѣсто того, чтобы сливать маточный металлъ и замѣщать его новой порціей, мы увеличили содержаніе въ немъ олова, прибавивъ къ нему извѣстное количество расплавленнаго сплава, содержащаго, положимъ, 80% олова и 20% свинца и имѣющаго ту же самую начальную температуру 212°.

Короче говоря, система не въ состояніи выдержать измѣненія степени концентраціи расплавленнаго металла, если оно не сопровождается соотвѣтственнымъ измѣненіемъ температуры. Ибо, измѣненіе въ сторону бо́льшаго содержанія свинца ведетъ къ новой двухфазной системѣ, твердое олово и твердый свинецъ, измѣненіе же въ сторону бо́льшаго содержанія олова ведетъ къ новой однофазной системѣ, расплавленный растворъ олова въ свинцѣ. Этотъ результатъ находится въ полномъ согласіи съ правиломъ фазъ, потому что измѣненіе концентраціи, не сопровождающееся соотвѣтственнымъ измѣненіемъ температуры, представляетъ собой въ дѣйствительности произвольное измѣненіе какъ концентраціи, такъ и температуры; моноваріантная же си-

стема, какъ гласитъ правило фазъ, не въ состоянiи выдержать такого измѣненiя.

Такимъ образомъ, всестороннее изслѣдованiе подтверждаетъ, что разсматриваемая система моноварiантна.

255) Тотъ же самый сплавъ свинца съ оловомъ (составъ *G*) при точкѣ замерзанiя эвтектики, положимъ при *J*, рис. 24.—Предположимъ, что весь избыточный свинецъ вымерзъ и что маточный металлъ достигъ эвтектическаго состава, *B*, именно 69% олова и 31% свинца; предположимъ, далѣе, что часть этого эвтектическаго маточнаго металла замерзла, часть же еще остается расплавленной. Здѣсь фазами являются: 1) твердый свинецъ, состоящiй изъ *A*)—избытка сверхъ эвтектической пропорцiи, вымерзшаго между *H* и *J*, изъ *B*)—пластинокъ свинца, содержащихся въ замерзшей части эвтектики; 2) твердое олово, въ замерзшей части эвтектики; 3) расплавленный растворъ олова въ свинцѣ, незамерзшая часть эвтектическаго маточнаго металла. Итакъ, число фазъ равно тремъ, число же компонентовъ по прежнему равно двумъ, свинецъ и олово.

Уравненiе $L = 2 + 1 - 3 = 0$ показываетъ, что система нонварiантна. Посмотримъ, такъ ли это въ дѣйствительности. Возможны слѣдующiя измѣненiя 1) повышенiе и 2) пониженiе температуры; 3) увеличенiе и 4) уменьшенiе концентрацiи олова въ расплавленной части маточнаго металла. Разсмотримъ эти измѣненiя въ отдѣльности. Если система дѣйствительно нонварiантна, она должна нарушаться при наступленiи любого изъ этихъ измѣненiй.

1) Повышенiе температуры. При нагрѣванiи замерзшая часть эвтектики начнетъ плавиться, при чемъ температура будетъ оставаться постоянной до тѣхъ поръ, пока плавленiе не закончится; только послѣ этого температура начнетъ повышаться. Но при полномъ плавленiи эвтектики исчезнетъ и твердое олово. Короче говоря, повышенiе температуры можетъ наступить только послѣ того, какъ нарушится система, вслѣдствiе исчезновенiя одной изъ твердыхъ фазъ, твердаго олова; однимъ словомъ, система не можетъ выдержать повышенiя температуры.

2) Пониженiе температуры. Подобнымъ же образомъ, при охлажденiи извнѣ, расплавленная часть эвтектическаго маточнаго металла начнетъ замерзать, при чемъ температура будетъ оставаться постоянной, пока послѣднiй не замерзнетъ нацѣло,

т. е. пока не исчезнетъ расплавленная фаза системы. Только тогда температура упадетъ ниже 180°. Короче говоря, пониженіе температуры можетъ наступить только послѣ нарушенія системы, вслѣдствіе исчезновенія расплавленной фазы, расплавленнаго раствора олова въ свинцѣ. Иными словами, система не въ состояніи выдержать пониженія температуры.

Мы видѣли, что въ интервалѣ избирательнаго замерзанія, въ L', рис. 24 (въ отличіе отъ разсматриваемаго нами интервала замерзанія эвтектики), система была въ состояніи перенести какъ повышеніе, такъ и пониженіе температуры, при условіи соотвѣтственнаго измѣненія концентраціи расплавленной фазы. Здѣсь, однако, сохранить систему безъ нарушенія, прибѣгнувъ къ подобному пріему, было бы нельзя, ибо при повышеніи температуры замерзшая часть эвтектики должна была бы расплавиться, независимо отъ состава соприкасающейся съ ней расплавленной фазы, и одна изъ твердыхъ фазъ, твердое олово, должно было бы исчезнуть. Далѣе, любое пониженіе температуры должно было бы повести къ исчезновенію расплавленной фазы, расплавленнаго раствора или маточнаго металла, независимо отъ ея состава, потому что никакой сплавъ свинца съ оловомъ не можетъ оставаться расплавленнымъ ниже температуры 180°, температуры, представляющей собой точку замерзанія самаго легкоплавкаго сплава свинца съ оловомъ. Такимъ образомъ, любое пониженіе температуры должно вести къ замѣнѣ расплавленной фазы твердымъ сплавомъ свинца съ оловомъ, т. е. къ нарушенію системы и къ переходу ея изъ трехфазной въ двухфазную систему; послѣдняя должна состоять изъ 1) твердаго свинца и 2) твердаго олова, потому что любой твердый сплавъ свинца съ оловомъ долженъ представлять собой смѣсь пластинокъ свинца и пластинокъ олова, благодаря допускаемой нами полной взаимной нерастворимости этихъ металловъ въ твердомъ состояніи.

Итакъ, никакое измѣненіе концентраціи не можетъ воспрепятствовать нарушенію этой системы при измѣненіи температуры, ибо повышеніе температуры должно вызывать исчезновеніе твердой фазы, олова, пониженіе же температуры—исчезновеніе расплавленной фазы, маточнаго металла.

3) Увеличеніе и 4) уменьшеніе концентраціи олова въ расплавленномъ маточномъ металлѣ. Температура, при которой находится нашъ сплавъ ниже точки замерзанія любого сплава

свинца съ оловомъ, ибо мы приняли, что онъ находится при точкѣ замерзанія эвтектики, представляющей собой самый легкоплавкій сплавъ свинца съ оловомъ. Слѣдовательно, замѣнить эту расплавленную фазу инымъ расплавленнымъ сплавомъ съ большимъ или меньшимъ содержаніемъ олова не представлялось бы возможнымъ, такъ какъ никакой иной сплавъ не могъ бы оставаться въ расплавленномъ состояніи при этой температурѣ. Всякій иной сплавъ, болѣе богатый или болѣе бѣдный оловомъ, долженъ быть при этой температурѣ въ твердомъ состояніи. Будучи же твердымъ, онъ состоялъ бы изъ смѣси пластинокъ свинца и олова, ибо для упрощенія мы приняли, что эти металлы взаимно абсолютно нерастворимы въ твердомъ состояніи. Такимъ образомъ, если бы мы замѣнили расплавленную фазу подобнымъ твердымъ сплавомъ, мы получили бы систему, состоящую изъ 1) твердаго свинца, включая сюда какъ *A*) избытокъ свинца сверхъ эвтектической пропорціи, вымерзшій между *H* и *J*, такъ и *B*) твердый свинецъ въ твердомъ сплавѣ, замѣнившемъ собой расплавленную фазу; изъ 2) твердаго олова, въ томъ же твердомъ сплавѣ. Короче говоря, получилась бы новая друхфазная система вмѣсто первоначальной трехфазной системы, потому что одна изъ первоначальныхъ фазъ, расплавленный растворъ олова въ свинцѣ, исчезла бы при этомъ. Однимъ словомъ, эта система не въ состояніи выдержать ни увеличенія, ни уменьшенія концентраціи олова въ расплавленной фазѣ.

Итакъ, мы убѣдились въ томъ, что эта система не можетъ выдержать ни одного изъ четырехъ возможныхъ измѣненій температуры или концентраціи. Слѣдовательно, по всестороннемъ испытаніи она оказывается дѣйствительно нонваріантной.

256) Соединенія желѣза съ углеродомъ.—Въ качествѣ простѣйшаго примѣра разсмотримъ сталь, содержащую 0,50°/₀ углерода, Sh^{v}, фиг. 68, при шести различныхъ температурахъ, 1600°S, 1500°, 1300°S', 720$S^{\circ\prime\prime}$, 690°h'^{v} и 0°h^{v}. Эти температуры соотвѣтствуютъ 1) расплавленному состоянію, 2) періоду избирательнаго замерзанія, 3) состоянію аустенита, 4) выдѣленію феррита немного выше рекалесценціи, 5) рекалесценціи и 6) состоянію при обычной или комнатной температурѣ. При полученіи стали при обычной температурѣ мы сталкиваемся съ двумя случаями, въ зависимости отъ того, *A*) закалена (быстро охлаждена) сталь или *B*) незакалена (медленно охлаждена).

Число компонентовъ всегда будетъ равно двумъ, желѣзо и углеродъ; слѣдовательно, при трехъ фазахъ система будетъ нонваріактна, при двухъ—моноваріантна и при одной—диваріантна.

1) При 1600°S фаза одна, расплавленное углеродистое желѣзо; система диваріантна.

2) При 1500°, въ періодѣ избирательнаго замерзанія, фазъ двѣ, расплавленное углеродистое желѣзо и твердый аустенитъ. Система моноваріантна.

3) При 1300°S', только одна фаза, аустенитъ. Система диваріантна.

4) При 720°S'', фазъ двѣ, 1) свободное желѣзо, выдѣлившееся въ пластичной, находящейся при красномъ каленіи массѣ, въ видѣ феррита между h''' и S''; и 2) остаточный аустенитъ, изъ котораго оно выдѣлилось и въ которомъ оно еще заключено. Система моноваріантна.

5) При 690°h^{IV}, при рекалесценціи, фазъ три, ферритъ и цементитъ (частью въ видѣ перлита), образовавшіеся при распаденіи аустенита, и остаточный аустенитъ, не распавшійся еще на ферритъ и цементитъ. Система нонваріантна.

6 A) При комнатной температурѣ, h^{V}, фазъ двѣ, ферритъ и цементитъ, если распаденіе аустенита произошло нацѣло и если имѣется только перлитъ и, въ качествѣ избыточнаго вещества, ферритъ. Система моноваріантна и находится въ равновѣсіи. Нагрѣваніе до 300° не оказываетъ на нее вліянія.

6 B) При комнатной температурѣ, h^{V}, фазъ три, аустенитъ, ферритъ и цементитъ, въ томъ случаѣ, если сталь закалена путемъ настолько быстраго охлажденія, что часть аустенита не успѣла перейти въ ферритъ и цементитъ. Система нонваріантна и не находится въ равновѣсіи. При нагрѣваніи до 200°, при отпускѣ, происходитъ дальнѣйшій переходъ аустенита въ ферритъ и цементитъ.

Соображеній, приведенныхъ въ §§ 250—255, достаточно для объясненія всѣхъ этихъ случаевъ.

257) Правило фазъ приложимо только къ такъ называемымъ системамъ. — Вполнѣ возможны недоразумѣнія при попыткахъ прилагать правило фазъ въ тѣхъ случаяхъ, когда оно совершенно непримѣнимо, въ случаяхъ, когда не имѣется системы въ томъ смыслѣ, какъ это понимается правиломъ фазъ.

Такъ, можно представить себѣ слѣдующее разсужденіе: «Я положу при обыкновенной температурѣ кусокъ сѣры на кусокъ желѣза. Компонентовъ два, сѣра и желѣзо; фазъ двѣ, сѣра и желѣзо. Степень свободы $= n + 1 - r = 2 + 1 - 2 = 1$. Слѣдовательно, это моноваріантная система. Слѣдовательно, если я буду нагрѣвать сѣру и желѣзо, согласно правилу фазъ, они не должны вступать въ реакцію между собой. Но я знаю, что при нагрѣваніи они реагируютъ между собой. Слѣдовательно, правило фазъ невѣрно и приводитъ къ ложнымъ выводамъ».

Но дѣло въ томъ, что это вовсе не система. Сѣра и желѣео не представляютъ собой фазъ, въ которыя перешла нѣкоторая иная система. Пояснимъ это на примѣрѣ феррита и цементита. Эти вещества, входящія въ составъ медленно охлажденной стали, возникая при распаденіи аустенита, изъ котораго состоитъ сталь выше температуры превращенія, образуютъ двуфазную систему; однако, если бы мы изолировали частички чистаго цементита и частички чистаго феррита и смѣшали ихъ при обыкновенной температурѣ, мы не получили бы системы. Правило фазъ не можетъ дать никакихъ указаній относительно такой механической смѣси.

Другое дѣло, если бы расплавленное сѣрнистое желѣзо распадалось при охлажденіи на отдѣльныя частички свободнаго желѣза и свободной сѣры; въ такомъ случаѣ мы могли бы съ полнымъ правомъ сказать, что эта система моноваріантна, т. е. что сѣра и желѣзо не соединятся при нагрѣваніи.

258) Правило фазъ въ одномъ отношеніи качественно, а не количественно. — Правило фазъ количественно, поскольку это касается до числа компонентовъ и фазъ, но оно совершенно не даетъ указанія на то, въ какомъ количествѣ данная фаза или компонентъ входитъ въ систему, и въ этомъ смыслѣ оно качественно. Пояснимъ это на примѣрѣ сплава свинца съ оловомъ во время избирательнаго замерзанія (§ 254). Въ самомъ началѣ избирательнаго замерзанія, когда вымерзшій свинецъ составляетъ, по вѣсу, скажемъ, 1% всего сплава, мы имѣемъ слѣдующія двѣ фазы:

1) твердый свинецъ, составляющій 1% всего сплава,

2) расплавленный сплавъ свинца съ оловомъ, составляющій 99% всего сплава. По мѣрѣ дальнѣйшаго хода замерзанія, пропорція твердаго свинца все увеличивается, пропорція же рас-

плавленнаго маточнаго метaлла все уменьшается. Несмотря на это, твердый свинецъ и расплавленный маточный металлъ все время остаются въ равновѣсіи и образуютъ все ту же самую систему.

Въ самомъ дѣлѣ, небольшого размышленія достаточно, чтобы убѣдиться въ томъ, что равновѣсіе—правило же фазъ только и касается вопросовъ равновѣсія — носитъ чисто качественный характеръ. Провѣримъ это положеніе на простомъ примѣрѣ.

Въ большой камерѣ $FGHK$ (рис. 80) помѣщается сосудъ B, съ которымъ соединены сосудъ C и сосудъ A. Наполнивъ сосуды C и B водой до уровня L и открывъ клапанъ, при помощи котораго A соединяется съ воздухомъ, повысимъ температуру камеры $FGHK$ до 100°. Будемъ поддерживать кипѣніе до полнаго удаленія воздуха изъ A. Затѣмъ закроемъ этотъ клапанъ и изолируемъ такимъ образомъ систему ABC. Клапаны же D и E остаются открытыми, такъ что всѣ три сосуда свободно сообщаются между собой. Теперь поднимемъ температуры до 121,4° Ц.; вода въ B будетъ испаряться до тѣхъ поръ, пока давленіе пара (упругость пара) въ верхней части B и въ A не достигнетъ 2 атмосферъ. При этой температурѣ и давленіи вода и паръ находятся между собой въ равновѣсіи.

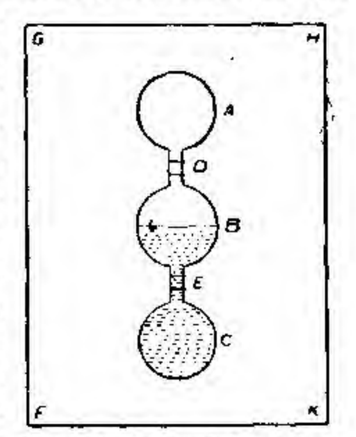


Рис. 80. Равновѣсіе имѣетъ качественный, а не количественный характеръ.

Дальнѣйшее испареніе воды уравновѣшивается одновременно съ нимъ идущей конденсаціей пара, такъ что на видъ кажется, что не происходитъ ни испаренія, ни конденсаціи. Легко убѣдиться въ томъ, что это равновѣсіе совершенно не зависитъ отъ относительнаго количества воды и пара. Положимъ, оставляя постоянными температуру и давленіе, мы закроемъ клапанъ E. Очевидно, это не вызоветъ ни дальнѣйшаго испаренія, ни дальнѣйшей конденсаціи; это вообще не окажетъ никакого дѣйствія. Положимъ, далѣе, что, оставивъ клапанъ E закрытымъ, мы совершенно удалимъ сосудъ C. Количество воды, остающейся въ системѣ, будетъ составлять только приблизительно одну треть первоначаньнаго количества, количество же пара не измѣнится. Отно-

шеніе между количествомъ воды и пара сильно измѣнилось, но это измѣненіе *не оказало никакого вліянія на равновѣсіе.*

Равнымъ образомъ, равновѣсіе не было бы нарушено, если бы, закрывъ клапанъ D, мы выключили изъ системы паръ, заключающійся въ A, или вновь бы присоединили, поддерживая температуру и давленіе постоянными, сосудъ A или C, или оба вмѣстѣ, и открыли оба клапана D и E, или одинъ изъ нихъ. Такимъ образомъ, мы видимъ, что какъ бы мы ни измѣняли относительно количества воды и пара, это *не будетъ вліять на равновѣсіе*, если только температура и давленіе остаются постоянными.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

Прогрессъ въ металлургіи желѣза и стали между 1880 и 1900 г.[1].

259) Общій обзоръ.—За послѣднее двадцатилѣтіе девятнадцатаго вѣка міровое производство чугуна болѣе чѣмъ удвоилось, производство стали увеличилось въ пять разъ, производство же сварочнаго желѣза пріобрѣло второстепенное значеніе. Соединенные Штаты, занимавшіе по производству чугуна и стали второе мѣсто, заняли первое и далеко оставили за собой всѣ остальныя страны. Производство чугуна въ Соединенныхъ Штатахъ болѣе чѣмъ утроилось и на 54% превысило производство чугуна въ Великобританіи, производство же стали увеличилось болѣе, чѣмъ въ восемь разъ, по сравненію съ 1880 г., при чемъ превысило болѣе чѣмъ вдвое производство стали въ Великобританіи и на 54% въ Германіи и Люксембургѣ вмѣстѣ взятыхъ, достигнувъ 38% всего мірового производства. За этотъ періодъ основной мартеновскій и основной бессемеровскій процессы вышли изъ начальной стадіи развитія и пріобрѣли огромное значеніе;

---

[1]) Большая часть этой главы появилась въ видѣ статьи о желѣзѣ и стали въ дополненіи къ Encyclopaedia Britannica, изданномъ лондонскимъ «Times». Для даннаго труда нѣкоторыя части этой статьи были выпущены, другія расширены, кромѣ того были сдѣланы нѣкоторыя дополненія и статистическія данныя были замѣнены болѣе поздними.

Авторъ выражаетъ искреннюю признательность «Times» за разрѣшеніе воспользоваться здѣсь этой статьей.

при помощи этихъ процессовъ въ вышеупомянутыхъ трехъ странахъ, производящихъ большую часть желѣзныхъ продуктовъ, получается почти столько же стали, сколько ея производилось во всемъ мірѣ въ 1880 г. Изъ общаго количества стали, выдѣланной въ этихъ трехъ странахъ въ 1899 г., около 43% было приготовлено при помощи кислаго бессемеровскаго процесса, 20% при помощи основного бессемеровскаго процесса, 16% при помощи кислаго мартеновскаго процесса, 18% при помощи основного мартеновскаго процесса — процесса, отъ котораго надо ожидать теперь наибольшаго развитія — и только около 1% при помощи тигельнаго процесса и другихъ менѣе важныхъ процессовъ. Производство сварочнаго желѣза въ Соединенныхъ Штатахъ, которое въ 1880 г. на 67% превышало производство стали, составляетъ теперь только одну шестую послѣдняго; можно сказать, что сварочное желѣзо почти совсѣмъ не примѣняется болѣе для выдѣлки рельсъ, балокъ и другихъ важныхъ частей мостовъ и желѣзныхъ построекъ, хотя, вѣроятно, оно еще долго будетъ примѣняться для нѣкоторыхъ спеціальныхъ цѣлей, благодаря своей тягучести и легкости, съ которою оно сваривается.

При помощи тонкихъ методовъ изслѣдованія была обнаружена природа и строеніе различныхъ разновидностей желѣза. Это не мало способствовало выработкѣ раціональныхъ методовъ тепловой обработки, отъ которыхъ впредь надо ожидать еще большаго развитія, а также открытію и примѣненію многочисленныхъ «спеціальныхъ» сталей.

При изготовленіи броневыхъ плитъ сварочное желѣзо не только было совершенно вытѣснено сталью, но при томъ еще въ общее употребленіе вошла спеціальная сталь, подвергаемая цементаціи и тепловой обработкѣ. То же самое можно сказать и относительно многихъ другихъ важныхъ издѣлій, отъ которыхъ требуется высшее качество. Такъ, изъ подобныхъ матеріаловъ дѣлаются всѣ бронебойные снаряды и многія важныя части паровыхъ машинъ, въ особенности паровыхъ машинъ для морскихъ судовъ.

Послѣдніе двадцать лѣтъ были свидѣтелями большого упрощенія во всемъ производствѣ желѣза и стали и развитія въ примѣненіи механическихъ приспособленій, въ особенности при производствѣ такихъ сравнительно простыхъ издѣлій, какъ

рельсы, проволока, листы, трубы, балки и т. п. Кромѣ того, сосредоточеніе производства въ огромныхъ предпріятіяхъ дало возможность пользоваться дорогими, мощными, сокращающими работу машинами, и держать большой штатъ хорошо образованныхъ спеціалистовъ, задача которыхъ состоитъ въ изслѣдованіи и наблюденіи съ величайшимъ вниманіемъ даже самыхъ мелкихъ деталей производства. За послѣднее десятилѣтіе XIX вѣка при многихъ важныхъ процессахъ стоимость работы упала почти на половину, и при этомъ заработная цѣна не была понижена.

Процессы, служащіе для «непосредственнаго» полученія изъ руды сварочнаго желѣза, въ настоящее время утратили свое значеніе, но не совсѣмъ утратили его въ будущемъ. Теперь почти вся добываемая руда переработывается въ чугунъ въ доменныхъ печахъ. Производительность доменныхъ печей была сильно повышена благодаря смѣлости въ примѣненіи мощныхъ воздуходувныхъ машинъ, печей для нагрѣванія дутья, а также болѣе совершенныхъ приспособленій для охлажденія нижней части печи, обусловливающихъ лучшую ея сохранность. Теперь средняя производительность одной доменной печи Carnegie достигаетъ 200,000 тоннъ въ годъ, при чемъ она превышаетъ производительность всѣхъ доменныхъ печей въ Соед. Штатахъ въ 1830 г., въ десять разъ больше производительности ихъ въ 1820 г. и составляетъ четверть производительности доменныхъ печей во всемъ мірѣ въ 1800 г. Пользованіе газами, получающимися при доменномъ процессѣ, для приведенія въ дѣйствіе газовыхъ двигателей, сильно увеличило значеніе послѣднихъ, какъ источниковъ силы; въ силу этого заводы, на которыхъ прокатные станы и другія механическія приспособленія расположены вблизи доменной печи и могутъ, слѣдовательно, приводиться въ движеніе такими двигателями, получаютъ новое и часто непреодолимое преимущество передъ своими соперниками.

Примѣненіе большихъ шихег'овъ, служащихъ для уменьшенія неравномѣрности состава чугуна по выпускѣ его изъ домны, даетъ возможность вести непосредственно бессемерованіе этого чугуна, прежде чѣмъ онъ затвердѣетъ и потеряетъ, такимъ образомъ, безполезно свое тепло. Этотъ же пріемъ нашелъ широкое примѣненіе въ мартеновскомъ процессѣ и даже были попытки примѣнить его и къ пудлинговому процессу.

Емкость одного бессемеровскаго конвертера достигаетъ теперь 20 тоннъ, мартеновской печи 70 тоннъ; благодаря системѣ отливки въ изложницы, помѣщающіяся на вагонеткахъ, производительность одной пары бессемеровскихъ конвертеровъ достигаетъ въ настоящее время 65,872 тоннъ въ мѣсяцъ,—въ шестьдесятъ разъ больше, чѣмъ въ 1870 г., и въ четыре раза больше, чѣмъ въ 1880 г. На нѣкоторыхъ заводахъ, работающихъ по способу Бессемера, желѣзо не только не остываетъ между моментомъ засыпки его въ домну въ видѣ руды и полученіемъ его изъ-подъ валиковъ въ видѣ рельса, но и во время всѣхъ промежуточныхъ операцій оно нагрѣвается при помощи топлива только въ домнѣ, такъ какъ при бессемерованіи разогрѣваніе идетъ на счетъ составныхъ частей чугуна, а въ колодцѣ (soaking pit) происходитъ только равномѣрное распредѣленіе тепла въ болванкѣ, а не нагрѣваніе ея.

260) Спеціальныя стали нашли широкое примѣненіе, которое въ дальнѣйшемъ еще должно будетъ сильно возрасти. Наиболѣе важныя изъ нихъ, это никкелевая сталь, марганцовая, хромовая, молибденовая и вольфрамовая. Обыкновенно, достоинство данной разновидности желѣза или стали измѣряется тою степенью, до которой она соединяетъ въ себѣ сопротивленіе разрыву и твердость съ тягучестью. Эти два свойства обычно исключаютъ другъ друга, ибо, какъ общее правило, все то, что̀ способствуетъ увеличенію твердости и сопротивленія разрыву стали и желѣза, въ то же время вызываетъ въ нихъ хрупкость, способность легко ломаться, особенно подъ вліяніемъ сотрясенія. Марганцовая и никкелевая сталь составляютъ важное исключеніе изъ этого правила, такъ какъ съ очень большой твердостью и сопротивленіемъ разрыву онѣ соединяютъ чрезвычайную тягучесть.

261) Никкелевая сталь, которая обычно содержитъ отъ 3 до 3,5% никкеля и около 0,25% углерода, соединяетъ очень большое сопротивленіе разрыву и твердость и очень высокій предѣлъ упругости съ большой тягучестью. Такое совмѣщеніе тягучести съ сопротивленіемъ разрыву и твердостью и вызвало широкое примѣненіе никкелевой стали для выдѣлки брони для военныхъ судовъ. Такъ, напримѣръ, бортовая броня военныхъ судовъ обыкновенно, если не всегда, въ настоящее время дѣлается изъ никкелевой стали, содержащей по формулѣ Круппа около 3,25% никкеля, 0,25% углерода и 1,5% хрома, и глубоко цемен-

тируется съ наружной стороны. Въ данномъ случаѣ, достоинство никкелевой стали заключается не столько въ томъ, что она представляетъ большое сопротивлeленіе пробиванію, какъ въ томъ, что она не раскалывается, даже при глубокомъ проникaніи въ нее снаряда.

Никкелевая сталь, обладая тягучестью и очень высокимъ предѣломъ упругости, служитъ цѣннымъ матеріаломъ для выдѣлки валовъ. Достоинство вала измѣряется способностью его противостоять тѣмъ повторнымъ напряженіямъ, которыя возникаютъ въ немъ при вращеніи, если нагрузка его не совсѣмъ постоянна. Крайнимъ примѣромъ такого непостоянства нагрузки можетъ служить нагрузка гребного вала морского судна, измѣняющаяся при встрѣчѣ съ каждой волной. Такія, періодически возникающія, напряженія гораздо болѣе вредно отзываются на металлѣ, чѣмъ постоянное напряженіе, и, достигая даже только половины предѣла упругости, могутъ повести къ разрыву. Прямой опытъ указалъ, что присутствіе 3,25% никкеля увеличило въ шесть разъ число оборотовъ, которое выдержалъ стальный валъ, прежде чѣмъ сломаться.

Были попытки примѣнять никкелевую сталь также для выдѣлки желѣзнодорожныхъ рельсовъ; для этой цѣли она обладаетъ достаточно малой гибкостью и хорошо противостоитъ изнашиванію, но опытъ показалъ, что рельсы, сдѣланные изъ нея, слишкомъ часто лопаются. Можно надѣяться, что этотъ недостатокъ современемъ удастся устранить.

На рис. 81 и 82 приведены сопротивленіе разрыву и тягучесть большого числа образцовъ никкелевой стали по различнымъ источникамъ, изъ которыхъ главнымъ является монографія M. Dumas[1]).

Приводимыя здѣсь кривыя взяты изъ его труда (стр. 18 и 19).

Можно замѣтить нѣкоторое сходство между этими кривыми и кривыми для марганцовой стали (рис. 83 и 84). Въ случаѣ марганцовой стали, большое увеличеніе тягучести наблюдается при содержаніи около 13% марганца; подобное же, очень рѣзкое, увеличеніе тягучести въ случаѣ никкелевой стали наблюдается при содержаніи около 25% никкеля. Точно также, какъ у ник-

---

[1]) «Recherches sur les Aciers au Nickel à Hautes Teneurs» M. L. Dumas. Paris, 1902.

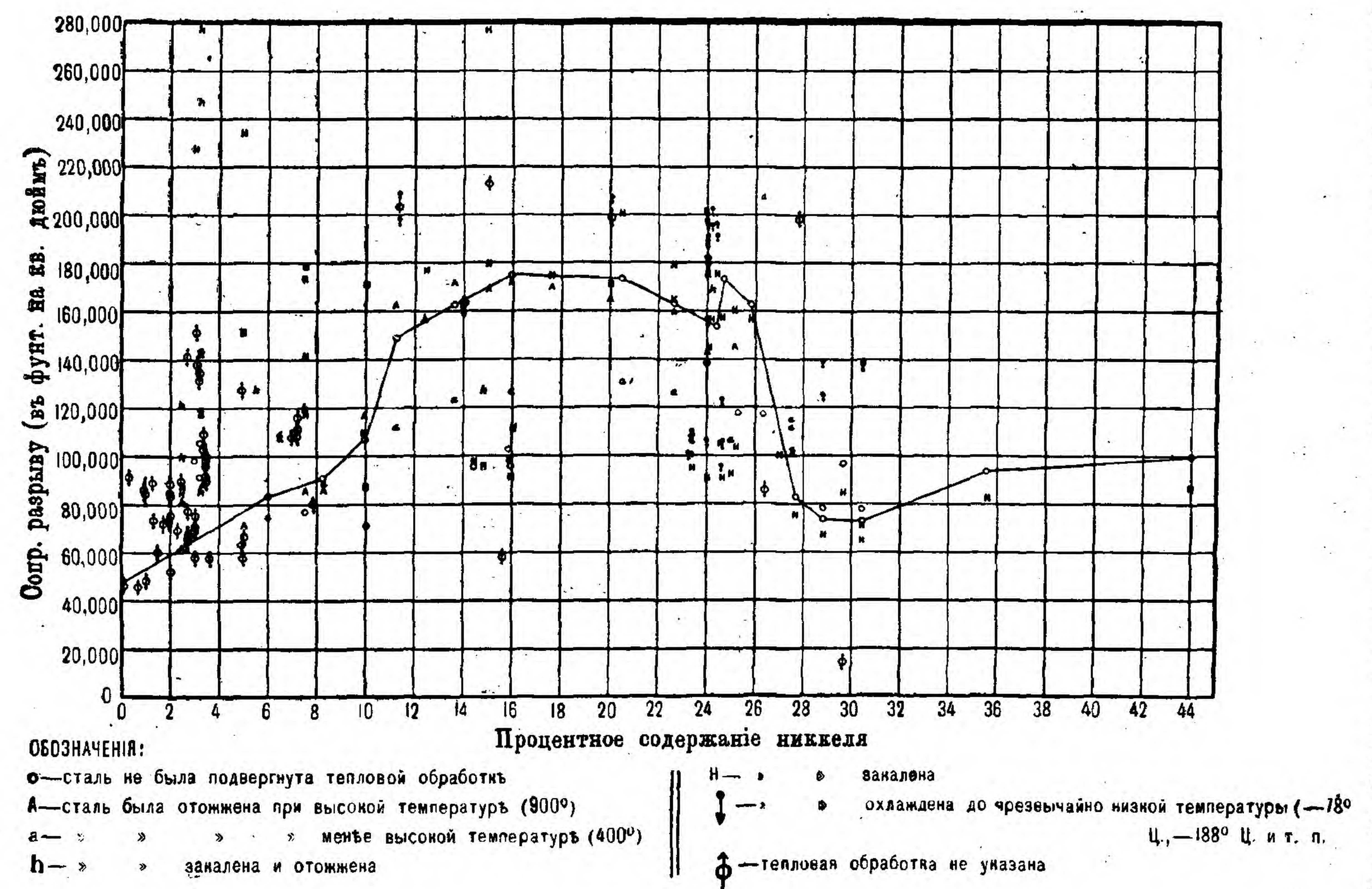


Рис. 81. Вліяніе, оказываемое содержаніемъ никкеля и различной тепловой обработкой на предѣлъ упругости никкелевой стали.

Примѣчаніе. Приводимая здѣсь кривая дана M. Dumas, loc. cit. стр. 357.

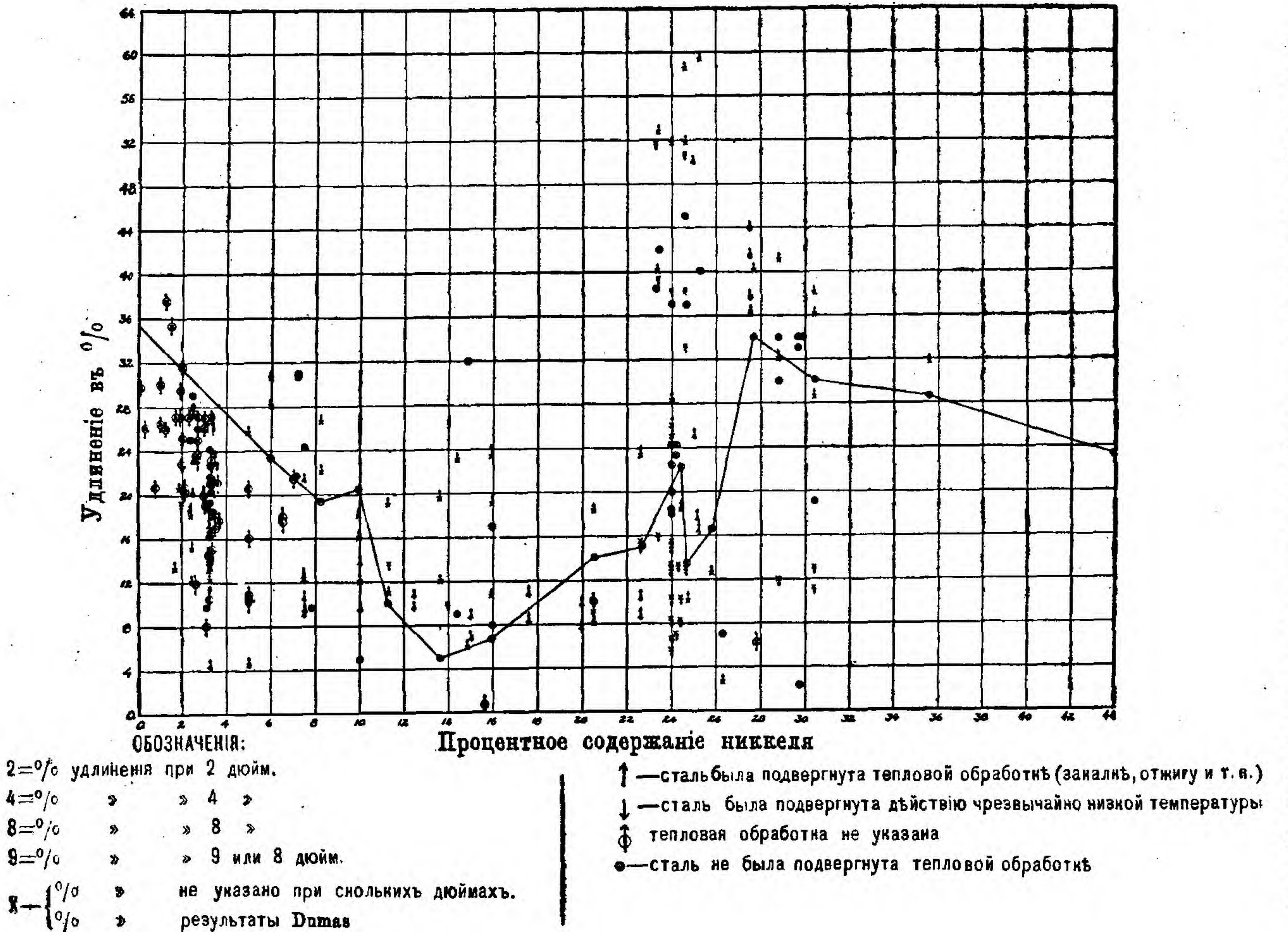


Рис. 82. Вліяніе, оказываемое содержаніемъ никкеля и различной тепловой обработкой на тягучесть никкелевой стали.

Примѣчаніе: Приводимая здѣсь кривая дана M. Dumas, loc. cit., стр. 357.

келевой, такъ и марганцовой стали большой тягучести отвѣчаетъ большое сопротивленіе разрыву.

262) Марганцовая сталь.—Обычно марганцовая сталь изготовляется съ содержаніемъ 12% марганца и 1,50% углерода. Присутствіе 1,50% марганца сообщаетъ стали хрупкость, сперва увеличивающуюся съ дальнѣйшимъ повышеніемъ содержанія марганца; такъ, сталь, содержащую отъ 4 до 5,5%, можно совершенно размельчить молоткомъ. Однако еще дальнѣйшее повышеніе оодержанія марганца сообщаетъ стали очень большую тягучесть, соединенную съ большой твердостью. До открытія

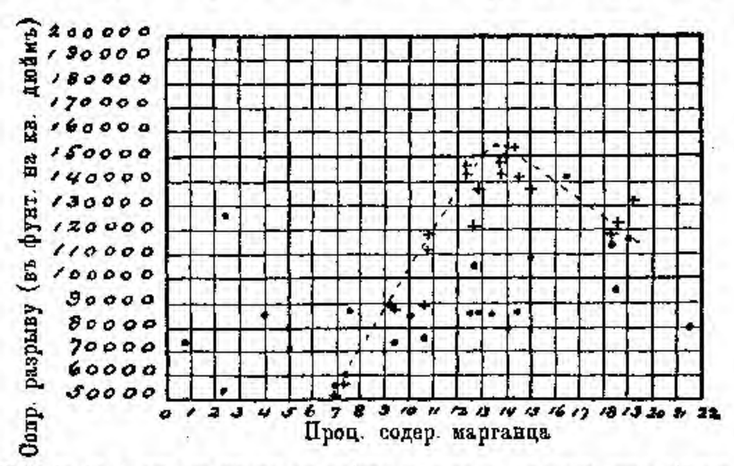


Рис. 83. Вліяніе, оказываемое содержаніемъ марганца, на сопротивленіе разрыву марганцовой стали.

Обозначенія:

· = медленно охлажденная марганцовая сталь.

+ = быстро охлажденная въ водѣ марганцовая сталь.

этого удивительнаго сплава, называемаго марганцовой сталью Hadfield'а, не было извѣстно, насколько я знаю, ни одного вещества, которое бы обладало такимъ сочетаніемъ свойствъ. На тягучесть марганцовой стали, составляющей одно изъ самыхъ цѣнныхъ ея свойствъ, оказываетъ огромное вліяніе скорость охлажденія. Быстрое охлажденіе сообщаетъ ей чрезвычайную тягучесть, медленное же охлажденіе—хрупкость. Такимъ образомъ, въ этомъ отношеніи марганцовая сталь представляетъ полную противуположность углеродистой стали. На твердость марганцовой стали, однако, скорость охлажденія не оказываетъ существеннаго вліянія. Она широко примѣняется для предметовъ,

отъ которыхъ требуется какъ твердость, такъ и тягучесть, напр. изъ нея выдѣлываются машины, служащія для раздробленія твердыхъ горныхъ породъ, желѣзнодорожныя крестовины, колеса для рудничныхъ вагонетокъ, кассы.

Обыкновенно воръ при помощи паяльной трубки простымъ

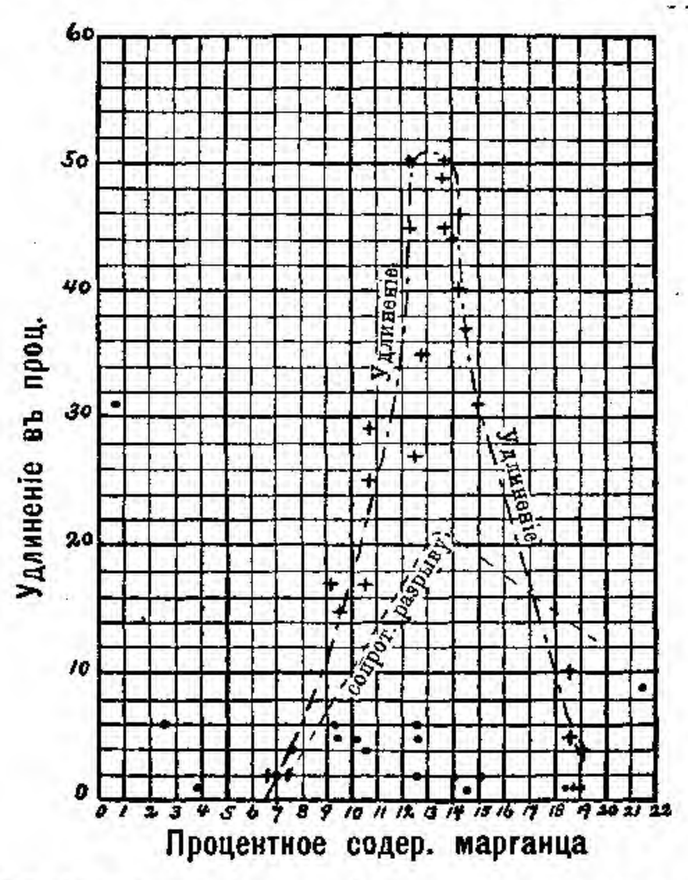


Рис. 84. Вліяніе, оказываемое содержаніемъ марганца, на тягучесть марганцовой стали.

Обозначенія:

• = медленно охлажденная марганцовая сталь.

+ = быстро охлажденная въ водѣ марганцовая сталь.

нагрѣваніемъ отпускаетъ на нѣкоторомъ пространствѣ закаленную углеродистую или хромовую сталь стѣнки кассы, затѣмъ по охлажденіи просверливаетъ его и закладываетъ внутрь зарядъ динамита. Сдѣлать же болѣе мягкой марганцовую сталь такимъ или какимъ-либо инымъ способомъ невозможно.

Неподдающаяся никакимъ воздѣйствіямъ твердость марганцовой стали даже ограничиваетъ до извѣстной степени область ея примѣненій, потому что при обработкѣ ея приходится прибѣ-

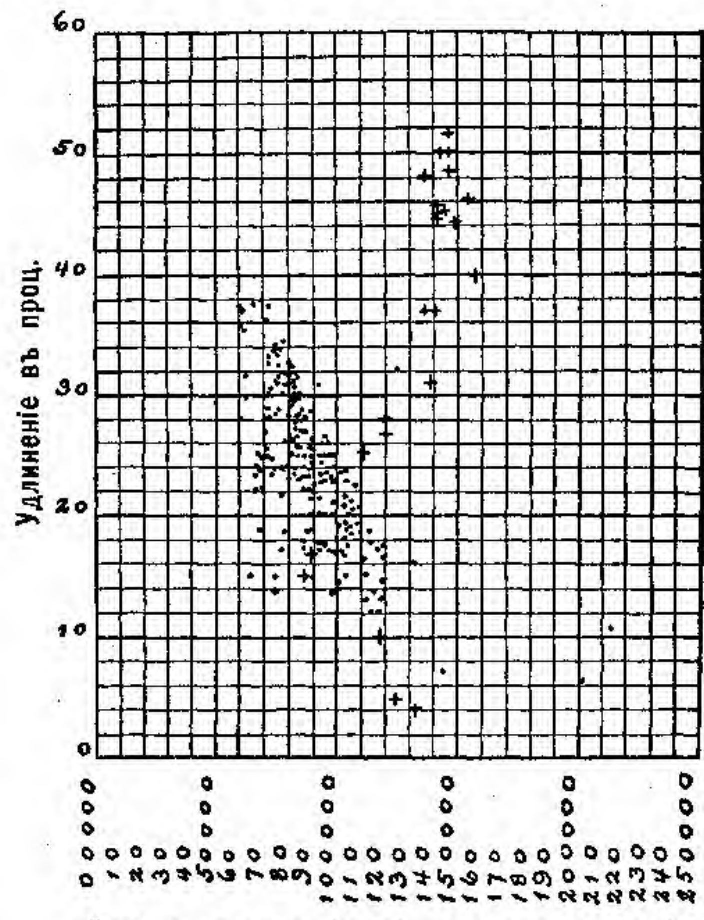


Рис. 85. Сопротивленіе разрыву и тягучесть углеродистой и марганцовой стали.

Обозначенія:

· = углеродистая сталь.

+ = быстро охлажденная въ водѣ марганцовая сталь.

гать къ наждачнымъ колесамъ, вмѣсто обычныхъ инструментовъ. Другой ея недостатокъ, это—относительно низкій предѣлъ упругости.

На рис. 83 представлено, какъ повышается сопротивленіе разрыву по мѣрѣ увеличенія содержанія марганца съ 7 до 13% и какъ затѣмъ при дальнѣйшемъ увеличеніи содержанія марганца сопротивленіе разрыву падаетъ. Разница въ положеніи

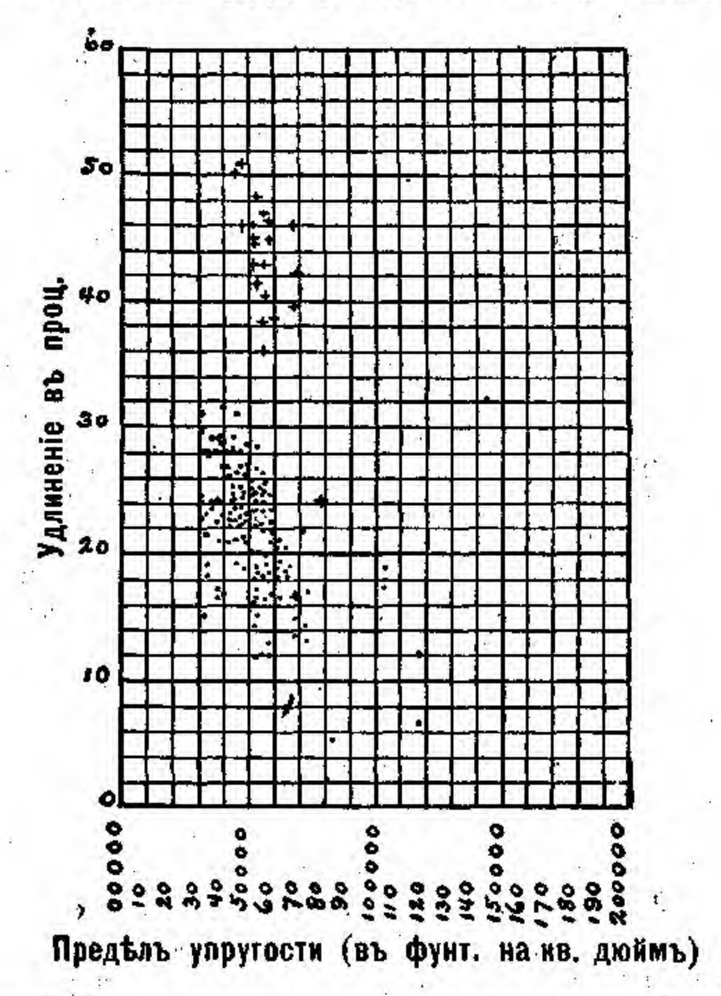


Рис. 86. Упругость и тягучесть углеродистой и марганцовой стали.

Обозначенія:

· = углеродистая сталь.

+ = быстро охлажденная въ водѣ марганцовая сталь.

крестиковъ и точекъ указываетъ также на замѣчательное вліяніе, оказываемое быстрымъ охлажденіемъ.

На рис. 84 представлено соотвѣтствующее измѣненіе тягучести. Для того, чтобы показать, что максимумъ сопротивленія

разрыву и максимумъ тягучести совпадаютъ, на фиг. 84 нанесена также кривая сопротивленія разрыву.

Рис. 85 указываетъ степень, до которой марганцовая сталь соединяетъ въ себѣ сопротивленіе разрыву съ тягучестью, фиг. 86—степень, до которой она соединяетъ въ себѣ тягучесть съ упругостью. Эти сочетанія часто служатъ приблизительной мѣрой степени пригодности металла для инженерныхъ цѣлей. Для сравненія, соотвѣтствующія свойства обыкновенной углеродистой стали обозначены точками; послѣднія, какъ видно, располагаются въ видѣ хорошо выраженной полосы гораздо ниже крестиковъ, относящихся къ марганцовой стали. Это сравненіе, однако, можетъ дать ложное понятіе о тягучести марганцовой стали. Удлиненіе можетъ служить сравнительной мѣрою тягучести двухъ металловъ только въ томъ случаѣ, если оно въ обоихъ случаяхъ происходитъ одинаковымъ образомъ. Образцы углеродистой стани обыкновенно разрываются, сильно утончаясь, образуя шейку какъ разъ около того мѣста, гдѣ происходитъ разрывъ, тогда какъ удлиненіе образцовъ марганцовой стали или бронзы распредѣляется гораздо болѣе равномѣрно по всей ихъ длинѣ. Для однихъ цѣлей такое равномѣрное растяженіе можетъ представлять преимущеотво передъ мѣстнымъ растяженіемъ, наблюдаемымъ у углеродистой стали, для другихъ оно можетъ быть невыгоднымъ. Благодаря тому, что растяженіе въ образцѣ марганцовой стали распространяется почти равномѣрно по всей его длинѣ, удлиненіе, выраженное въ процентахъ, можетъ дать преувеличенное представленіе объ истинной тягучести.

263) Хромовая сталь.—Достоинство хромовой стали, обычно содержащей около 2% хрома и отъ 0,80 до 2% углерода, заключается въ томъ, что, будучи закалена, она соединяетъ въ себѣ очень большую твердость съ высокимъ предѣломъ упругости; даже подъ вліяніемъ чрезвычайно сильныхъ ударовъ она не измѣняетъ формы и не даетъ трещинъ. Вслѣдствіе этого хромовая сталь служитъ обычнымъ матеріаломъ для выдѣлки бронебойныхъ снарядовъ. Она примѣняется также для нѣкоторыхъ частей машинъ, служащихъ для размельченія твердыхъ горныхъ породъ, для штамповъ и для кассъ.

Послѣднія дѣлаются такимъ образомъ. Берутся въ перемежку листы хромовой стали и мягкаго желѣза, обыкновенно въ числѣ пяти, свариваются и затѣмъ быстро охлаждаются, для того,

чтобы придать закалку хромовой стали. Твердая хромовая сталь хорошо противостоитъ сверлу вора, а тягучее желѣзо ударамъ молота.

264) Вольфрамовая сталь, обычно содержащая отъ 5 до 10°/о (иногда даже до 24°/о) вольфрама и отъ 0,4 до 2°/о углерода, обладаетъ большой ретентивностью (способностью сохранять остаточный магнетизмъ) и потому примѣняется для магнитовъ; она примѣняется также для токарныхъ рѣзцовъ и для другихъ инструментовъ, служащихъ для обработки металла и предназначаемыхъ для того, чтобы снимать толстую стружку.

Принадлежащія къ этому классу стали носятъ названіе «самозакаливающихся», вслѣдствіе того, что для закалки онѣ не требуютъ быстраго охлажденія. Совершенно достаточно нагрѣть ихъ выше критическаго интервала, т. е. до температуры, лежащей въ области IV (рис. 68), и затѣмъ охладить на воздухѣ. Присутствіе въ нихъ большого количества вольфрама препятствуетъ переходу аустенита при охлажденіи въ ферритъ и цементитъ; благодаря этому, даже будучи медленно охлаждены на воздухѣ, онѣ продолжаютъ оставаться въ состояніи аустенита, въ состояніи, которое можно придать обыкновенной углеродистой стали только путемъ закалки, т. е. путемъ быстраго охлажденія съ температуры, лежащей въ области IV.

Точно такимъ же образомъ вольфрамъ препятствуетъ переходу аустенита въ ферритъ и цементитъ въ инструментахъ, сдѣланныхъ изъ этой стали, въ тѣхъ случаяхъ, когда эти инструменты подвергаются нагрѣванію. Такъ, напримѣръ, подъ вліяніемъ тренія, когда приходится снимать на токарномъ станкѣ очень толстую желѣзную стружку, остріе инструмента можетъ разогрѣваться очень значительно, до 400°Ц. При подобной температурѣ инструментъ изъ обычной углеродистой стали потерялъ бы свою твердость, такъ какъ его аустенитъ перешелъ бы въ ферритъ и цементитъ. Составъ этихъ сталей, включая сюда и знаменитую сталь «Mushet», приблизительно слѣдующій:

Углеродъ	1,39	до	2,32°/о
Вольфрамъ	4,48	»	11,60°/о
Марганецъ	0,18	»	3,53°/о
Хромъ	0,20	»	3,96°/о

По моимъ наблюденіямъ, въ тѣхъ случаяхъ, когда эти стали содержатъ менѣе 1,50% марганца, онѣ всегда содержатъ по крайней мѣрѣ 1,40% хрома.

264 A). Хромо-вольфрамовая сталь.—Цѣнное качество вольфрамовыхъ сталей класса «Mushet», заключающееся въ томъ, что онѣ не утрачиваютъ своей твердости, даже будучи нагрѣты до 300°, сильно повышается съ дальнѣйшимъ увеличеніемъ содержанія въ нихъ вольфрама и съ прибавкой хрома. Они пріобрѣтаютъ способность сохранять твердость и рѣзать обычное желѣзо и сталь, даже будучи нагрѣты вслѣдствіе тренія до темнокраснаго каленія, или, скажемъ, до 600°.

Это обстоятельство позволяетъ пускать станки для обработки желѣза и стали, снабженные инструментами изъ указанной стали, съ гораздо большею скоростью, чѣмъ при примѣненіи инструментовъ изъ обычной углеродистой стали или изъ самозакаливающейся стали класса «Mushet».

Открытіе это, сдѣланное M. White'омъ и F. W. Taylor'омъ (Bethlehem, Pennsylvania), оказываетъ огромную услугу въ томъ безчисленномъ количествѣ случаевъ, когда приходится прибѣгать къ машинной обработкѣ металла, потому что оно увеличиваетъ во много разъ, быть можетъ въ шесть разъ, то количество работы, которое въ день можетъ сдѣлать человѣкъ, управляющій станкомъ. Составъ лучшихъ образцовъ этой стали колеблется въ слѣдующихъ предѣлахъ:

	Обычные предѣлы.	Одинъ изъ лучшихъ образцовъ.
Углеродъ.	0,32 до 1,28	0,68 до 0,67
Марганецъ.	0,03 » 0,30	0,07 » 0,11
Хромъ.	2,23 » 7,02	5,95 » 5,47
Вольфрамъ.	9,25 » 25,45	17,81 » 18,19

Передъ употребленіемъ инструментъ медленно нагрѣвается до 815° и затѣмъ быстро нагрѣвается почти вплоть до точки плавленія; вслѣдъ за этимъ быстро охлаждается до 850°, послѣ того медленно охлаждается на воздухѣ приблизительно до 20°, вновь нагрѣвается около 5 минутъ приблизительно при 850° и наконецъ охлаждается на воздухѣ.

Специфическое дѣйствіе, оказываемое совмѣстно хромомъ и вольфрамомъ, заключается въ томъ, что они каталитически за-

держиваютъ превращеніе желѣза и углерода изъ состоянія аустенита, нормальнаго для области IV, при которомъ углеродъ растворенъ въ гамма-желѣзѣ, или изъ состоянія мартенсита, при которомъ, быть можетъ, углеродъ растворенъ въ бэта-желѣзѣ, въ состояніе сравнительно мягкаго конгломерата изъ феррита и цементита, нормальнаго для области VIII. Вслѣдствіе этого сталь остается въ состояніи твердаго аустенита или мартенсита, даже если температура ея и достигнетъ верхней части области VIII подъ вліяніемъ тепла, развивающагося вслѣдствіе тренія. Если бы не существовало такой задержки, сталь почти мгновенно перешла бы въ ферритъ и цементитъ.

Цѣль, преслѣдуемая нагрѣваніемъ до высокой температуры, вѣроятно, заключается въ томъ, чтобы заставить углеродъ, а быть можетъ также вольфрамъ и хромъ, продиффундировать равномѣрно по всей массѣ аустенита въ области IV. Такая равномѣрная диффузія, очевидно, необходима для сообщенія стали твердости. Твердость при красномъ каленіи является слѣдствіемъ вліянія, оказываемаго сообща углеродомъ, вольфрамомъ и хромомъ. Если бы эти элементы были сконцентрированы въ стали въ извѣстныхъ мѣстахъ, въ другихъ же мѣстахъ они всѣ, или одинъ изъ нихъ, почти отсутствовали, тогда въ послѣднихъ аустенитъ не встрѣчалъ бы препятствія для перехода въ ферритъ и цементитъ. При охлажденіи, тамъ, гдѣ сохранился аустенитъ, сталь получилась бы чрезвычайно твердой; тамъ же, гдѣ образовался ферритъ и цементитъ, она была бы сравнительно мягкой. Но, какъ извѣстно, смѣсь твердыхъ зеренъ съ мягкими не можетъ дать твердаго тѣла. Инструментъ изъ мелкихъ алмазовъ, заключенныхъ въ свинцѣ, не можетъ служить для рѣзанія, ибо алмазы вдавливались бы въ свинецъ. Очевидно, что это относится только до рѣжущихъ инструментовъ, а не до точильныхъ или полировальныхъ. Наждачное колесо съ мягкой основной массой можетъ дѣйствовать хорошо, но если изъ такой смѣси сдѣлать рѣзецъ или ножъ, то, конечно, они не будутъ въ состояніи выдержать напряженія и должны сломаться или согнуться.

Прибѣгать къ нагрѣванію до высокой температуры, съ цѣлью вызвать болѣе равномѣрное распредѣленіе углерода, приходится вслѣдствіе постепеннаго выдѣленія изъ аустенита части углерода въ видѣ до-эвтектоиднаго цементита, происходящаго пу-

темъ реакціи 11) при охлажденіи въ области VII, и въ частности вслѣдствіе того, что цементитъ концентрируется въ видѣ сѣтки, какъ это указано на рис. 66 *F*. Правда, въ случаѣ обыкновенной стали этотъ до-эвтектоидный цементитъ очень быстро дифундируетъ по всей массѣ аустенита, если нагрѣть ее до температуры, лежащей въ области IV. Но въ случаѣ хромо-вольфрамовой стали такая диффузія возможна, повидимому, только при гораздо большей свободѣ молекулярнаго перемѣщенія, которая и можетъ быть единственно достигнута очень высокимъ нагрѣваніемъ. Мы можемъ себѣ представить, что какъ углеродъ, содержащійся въ цементитѣ, не соединяется съ вольфрамомъ, точно также и углеродъ, содержащійся въ аустенитѣ, не растворяется въ вольфрамѣ, хотя бы послѣдній и былъ распредѣленъ равномѣрно въ аустенитѣ. Далѣе, мы можемъ представить себѣ, что углеродъ не диффундируетъ черезъ частички вольфрама, а только черезъ частички желѣза. Теперь, представимъ себѣ, что мы нагрѣемъ до температуры, лежащей въ области IV, хромо-вольфрамовую сталь, содержащую 80% желѣза и 0,50% углерода и перешедшую въ ферритъ и цементитъ, благодаря тому, что она была охлаждена до температуры, лежащей въ области VIII. Въ такой стали каждая молекула углерода связана съ тремя молекулами желѣза, потому что формула цементита Fe_3C. Но на каждую молекулу углерода, если разсматривать всю массу металла, какъ одно цѣлое, приходится 34 молекулы желѣза, а слѣдовательно диффузія дойдетъ до конца только тогда, когда каждая молекула углерода распредѣлится между 34 молекулами желѣза. Въ углеродистой стали углеродъ диффундируетъ очень легко, потому что ничто не препятствуетъ его диффузіи. Въ случаѣ же хромо-вольфрамовой стали мы можемъ себѣ представить, что черезъ молекулы вольфрама, расположенныя между молекулами желѣза, находящагося въ состояніи аустенита, углеродъ не въ состояніи диффундировать и долженъ обходить ихъ черезъ молекулы желѣза. Это можно уподобить переходу войска черезъ ручей по нѣсколькимъ рядамъ камней. Вмѣсто того, чтобы двигаться сомкнутымъ строемъ, какъ по ровному мѣсту, оно принуждено разбиться на отдѣльныя цѣпи, изъ которыхъ каждая съ трудомъ пробирается по одному изъ рядовъ камней.

Подобную же картину представляетъ и затрудненіе, оказываемое вольфрамомъ равномѣрному распредѣленію углерода въ аустенитѣ,—углерода первоначально присутствующаго въ видѣ цементита. Высокій нагрѣвъ, слѣдовательно, нуженъ для того, чтобы вызвать диффузію углерода. Съ другой стороны, разъ углеродъ равномѣрно распредѣлился въ аустенитѣ при процессѣ Taylor-White подъ вліяніемъ высокаго нагрѣва, вольфрамъ въ силу тѣхъ же причинъ долженъ препятствовать тому, чтобы углеродъ вновь сконцентрировался въ видѣ цементита; слѣдовательно, вольфрамъ удерживаетъ металлъ въ состояніи твердаго мартенсита и не даетъ ему перейти въ сравнительно мягкое состояніе феррита и цементита. Этимъ и объясняется твердость, которую хромо-вольфрамовая сталь сохраняетъ при красномъ каленіи.

Въ однородномъ аустенитѣ каждая молекула углерода распредѣлена между 34 молекулами желѣза; въ цементитѣ же она соединена только съ тремя молекулами желѣза. Для перехода изъ состоянія аустенита въ состояніе цементита, молекула углерода должна необходимо порвать связь съ 31 молекулой желѣза и перемѣщаться до тѣхъ поръ, пока она не соединится только съ тремя молекулами желѣза. Обратное явленіе должно происходить при превращеніи цементита въ однородный аустенитъ. Такое перераспредѣленіе молекулъ углерода происходитъ довольно быстро, если не встрѣчается никакихъ къ тому препятствій. Но оно можетъ быть сильно замедлено въ томъ случаѣ, если молекулы желѣза, черезъ которыя должно идти перемѣщеніе, отчасти или совсѣмъ изолированы между собой молекулами вольфрама.

Эта картина не претендуетъ на то, чтобы представить, какимъ образомъ вольфрамъ дѣйствуетъ на самомъ дѣлѣ; скорѣе цѣль ея представить, какимъ образомъ онъ, быть можетъ, дѣйствуетъ.

Цѣль второго нагрѣва, которому подвергается инструментъ, по всей вѣроятности, заключается въ томъ, чтобы произошло до тщательно заранѣе опредѣленной степени превращеніе аустенита въ сторону феррита и цементита, т. е. чтобы значительная часть желѣза перешла изъ гамма-состоянія истиннаго аустенита въ гораздо болѣе твердое бэта-состояніе мартенсита.

265) Молибденовая сталь.—Вольфрамовая сталь очень дорога, вслѣдствіе большой стоимости вольфрама.

Тотъ фактъ, что, согласно закону Рауля, одна молекула молибдена оказываетъ почти то же дѣйствіе, какъ одна молекула вольфрама, т. е. что одна вѣсовая часть молибдена, оказываетъ такое же дѣйствіе, какъ двѣ вѣсовыхъ части вольфрама, подавалъ надежду на уменьшеніе стоимости этихъ сталей. Но на практикѣ при примѣненіи молибденовой стали возникли такія затрудненія, что врядъ ли эта надежда оправдается.

266) Глубокая цементація; процессы Harvey и Krupp.— Для выдѣлки броневыхъ плитъ большею частью примѣняется никкелевая сталь, содержащая такъ мало углерода, что она не принимаетъ закалки, т. е. остается очень тягучей даже послѣ быстраго охлажденія. Лицевой сторонѣ этихъ плитъ придаютъ требуемую твердость, превращая ее въ высокоуглеродистую сталь и сообщая закалку при помощи быстраго охлажденія. Harvey цементируетъ лицевую сторону на глубину приблизительно одного дюйма, нагрѣвая плиту около недѣли при температурѣ 1.200°Ц., при чемъ цементируемой стороной она плотно прилегаетъ къ слою древеснаго угля. Въ болѣе новомъ процессѣ Krupp'а цементація достигается тѣмъ, что лицевую сторону броневой плиты подвергаютъ дѣйствію свѣтильнаго газа при высокой температурѣ. Свѣтильный газъ при этомъ разлагается, и на поверхности плиты отлагается слой очень мелкихъ частицъ угля, который и поглощается сталью. Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ цементированную лицевую сторону быстро охлаждаютъ съ температуры краснаго каленія, направляя на нее ледяную воду въ видѣ тонкихъ струй. Такимъ образомъ, броня пріобрѣтаетъ очень твердую поверхность; начиная съ этой поверхности, внутрь твердость постепенно уменьшается. Благодаря чрезвычайной твердости лицевой стороны брони, снарядъ при попаданіи останавливается настолько внезапно, что онъ разлетается, и его энергія передается по частямъ осколками. Вслѣдствіе же того, что лицевая сторона неразрывно соединена съ незакаленной, тягучей и слегка подающейся внутренней частью и противоположной стороной, броневая плита не даетъ трещинъ и не раскалывается даже будучи нѣсколько согнута подъ вліяніемъ удара.

267) Общая схема производства желѣзныхъ продуктовъ представлена на фиг. 87. Въ сущности, можно сказать, что вся добываемая желѣзная руда переплавляется въ доменныхъ пе-

чахъ, при чемъ получается чугунъ. Этотъ чугунъ далѣе можетъ служить непосредственно для отливокъ или для переработки въ сварочное желѣзо или сталь; послѣднія далѣе подвергаются проковкѣ или прокаткѣ; въ частности, сталь можетъ служить для отливокъ.

Чугунныя отливки могутъ быть *А*) сѣрыми, *В*) закаленными или *С*) ковкими. Отливки изъ сѣраго чугуна примѣняются несравненно чаще, чѣмъ изъ закаленнаго и ковкаго чугуна.

А) При изготовленіи отливокъ изъ сѣраго чугуна, сырой чугунъ химически очень мало измѣняется; въ немъ происхо-

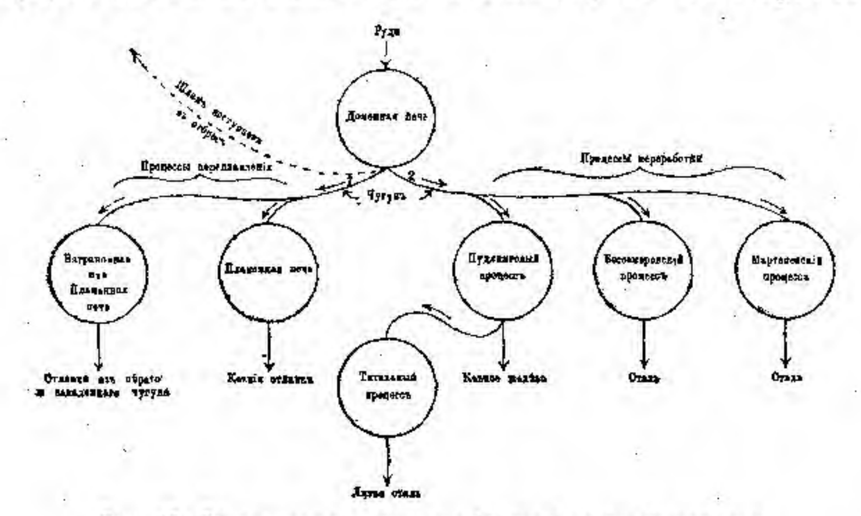


Рис. 87. Общая схема изготовленія желѣзныхъ продуктовъ.

дятъ только тѣ измѣненія, которыя возможны при его переплавленіи въ печи.

В) При изготовленіи отливокъ изъ закаленнаго чугуна, составъ чугуна точно также измѣняется очень мало; отливки пріобрѣтаютъ очень большую твердость вслѣдствіе быстраго охлажденія чугуна при поступленіи его въ изложницы. Часто при помощи тепловой обработки (отжига) въ чугунѣ вызываютъ дальнѣйшія измѣненія въ микроскопическомъ строеніи.

С) При изготовленіи ковкихъ чугунныхъ отливокъ, составъ чугуна нѣсколько измѣняется при окислительномъ его плавленіи; несмотря однако на это, получается бѣлый чугунъ, какъ извѣстно, отличающійся чрезвычайной хрупкостью. Изъ этого

чугуна дѣлаются желаемой формы отливки, которымъ затѣмъ при помощи долгаго нагрѣванія или «отжига» придается относительная прочность и ковкость. При отжигѣ происходитъ измѣненіе микроскопическаго строенія чугуна, состоящее въ томъ, что чрезвычайно твердый, хрупкій цементитъ, Fe_3C, переходитъ въ мягкій, тягучій ферритъ, смѣшанный съ очень мелко раздробленнымъ графитомъ. Кромѣ того, часть углерода удаляется путемъ поверхностнаго окисленія.

При переработкѣ на сварочное желѣзо и сталь, чугунъ подвергается очень большому очищенію. Въ сущности говоря, переработка его и состоитъ въ этомъ очищеніи.

Дѣло въ томъ, что по необходимости при доменномъ процессѣ получается чугунъ съ большимъ содержаніемъ углерода. Кромѣ того, желѣзная руда обыкновенно содержитъ много кремнекислоты (SiO_2), нѣкоторое количество фосфорной кислоты въ видѣ апатита ($3CaO$, P_2O_5), а также болѣе или менѣе марганца, въ видѣ перекиси марганца (MnO_2), и сѣры, въ видѣ пирита (FeS_2). Доменный процессъ представляетъ собой настолько сильный возстановительный процессъ, что возстановляется большая часть фосфорной кислоты, значительная часть окиси марганца и нѣкоторая часть кремнекислоты. Возникающіе при этомъ фосфоръ, марганецъ и кремній соединяются съ расплавленнымъ чугуномъ. Въ то же время часть сѣры, присутствующей въ видѣ пирита, точно также переходитъ въ чугунъ. Такимъ образомъ, чугунъ состоитъ изъ желѣза, въ которомъ въ видѣ примѣсей содержатся указанные элементы.

Слѣдующія реакціи могутъ служить типомъ возстановительныхъ реакцій, идущихъ въ доменной печи:

15) $SiO_2 + 2C = Si + 2CO$
16) $P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$
17) $MnO_2 + 2C = Mn + 2CO$
18) $Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$
19) $FeO + C = Fe + CO$.

Существенное отличіе между чугуномъ съ одной стороны, и сварочнымъ желѣзомъ и сталью съ другой стороны, заключается въ томъ, что первый содержитъ всегда гораздо больше углерода, обычно больше кремнія и часто больше марганца, фосфора и сѣры, чѣмъ это допустимо въ вторыхъ. Сущность всѣхъ

процессовъ, при помощи которыхъ чугунъ перерабатывается въ сварочное желѣзо и сталь, и состоитъ въ удаленіи этихъ посторонннхъ элементовъ. Насколько велико это отличіе, можно судить по слѣдующему примѣру:

	Чугунъ для основного бессемеровскаго процесса. %	Основная бессемеровская сталь. %
Углеродъ. . .	3,50	0,10
Кремній . . .	1,00	0,01
Марганецъ. . .	1,80	0,50
Фосфоръ. . .	1,80	0,07
Сѣра.	0,10	0,07

Углеродъ, кремній, фосфоръ, марганецъ и, до извѣстной степени, сѣра удалены при помощи ихъ окисленія. Источникомъ кислорода можетъ служить атмосферный воздухъ, какъ въ процессѣ Бессемера, или окись желѣза, напр. магнитный желѣзнякъ, какъ въ пудлинговомъ процессѣ, или и тотъ и другой, какъ въ мартеновскомъ процессѣ. Но, повидимому, атмосферный кислородъ скорѣе дѣйствуетъ косвеннымъ образомъ, т. е., повидимому, онъ или окисляетъ часть желѣза въ закись желѣза, или окисляетъ закись желѣза FeO въ магнитную окись желѣза Fe_3O_4. Насколько можно судить, окисленіе углерода и другихъ посторонннхъ элементовъ идетъ за счетъ этихъ окисловъ, а не атмосфернаго кислорода, какъ такового.

Реакціи окисленія идутъ слѣдующимъ образомъ:

20) $2P + 5Fe_3O_4 = P_2O_5 + 15FeO$
21) $Si + 2FeO = SiO_2 + 2Fe$
22) $C + FeO = CO + Fe$
23) $Mn + Fe_3O_4 = MnO + 3FeO$
24) $S + 2FeO = SO_2 + 2Fe$.

Эти реакціи слѣдуетъ принимать за типичныя. Весьма вѣроятно, что, въ случаѣ каждаго изъ этихъ пяти посторонннхъ элементовъ, окисленіе можетъ идти при посредствѣ какъ закиси желѣза (FeO), такъ и магнитной окиси (Fe_3O_4).

Продукты окисленія углерода и сѣры (окись углерода, CO, углекислота, CO_2, и сѣрнистый газъ, SO_2) летучи и тотчасъ уда-

ляются. Продукты же окисленія фосфора, кремія и марганца (фосфорная кислота, P_2O_5, кремнекислота, SiO_2, закись марганца, MnO) механически отдѣляются отъ желѣза, подобно тому, какъ масло отдѣляется отъ воды. Они соединяются съ другими присутствующими окисленными веществами и образуютъ шлакъ, представляющій собой или непрозрачную, землистую, подобную лавѣ, или стекловидную массу. Шлакъ представляетъ собой силикатъ, въ составъ котораго въ очень измѣнчивой пропорціи входятъ окиси желѣза, кальція, магнія, алюминія, а также, при извѣстныхъ условіяхъ, и фосфорная кислота. Въ расплавленномъ состояніи, шлакъ, обладая относительно небольшимъ удѣльнымъ вѣсомъ, всплываетъ въ видѣ слоя на расплавленномъ желѣзѣ и поэтому можетъ быть механически легко удаленъ.

Эти реакціи очищенія вызываются: 1) въ пудлинговомъ процессѣ—перемѣшиваніемъ окиси желѣза (въ видѣ силиката, очень богатаго этою окисью) съ расплавленнымъ чугуномъ, въ то время какъ послѣдній въ видѣ тонкаго кипящаго слоя находится на поду отражательной печи (фиг. 96); 2) въ бессемеровскомъ процессѣ—продуваніемъ холоднаго атмосфернаго воздуха черезъ расплавленный чугунъ, помѣщающійся въ глубокой, покрытой внутри слоемъ глины или доломита ретортѣ, называемой конвертеромъ; при этомъ быстрое повышеніе температуры вызывается чрезвычайно интенсивно идущимъ процессомъ окисленія; 3) въ мартеновскомъ процессѣ, подвергая расплавленный чугунъ, находящійся въ видѣ тонкаго и очень широкаго слоя на поду отражательной печи, дѣйствію покрывающаго его слоя шлака, содержащаго окись желѣза; обыкновенно, для того, чтобы повысить въ этомъ шлакѣ содержаніе окиси желѣза, въ него вносится кусками желѣзная руда (фиг. 97). Въ мартеновскомъ процессѣ, кромѣ очищенія чугуна при помощи реакцій окисленія, въ большинствѣ случаевъ концентрацію примѣсей сильно понижаютъ, прибавляя къ нему большое количество сравнительно чистыхъ стальныхъ обрѣзковъ.

Какъ при бессемеровскомъ, такъ и при мартеновскомъ процессѣ окисленіемъ нельзя достигнуть удаленія примѣсей до желаемой степени и въ то же время удержать въ желѣзѣ требуемое количество углерода, не введя въ него кислорода; кислородъ оказываетъ на металлъ весьма вредное вліяніе, но удаленіе его не представляетъ труда. Вслѣдствіе этого какъ тотъ, такъ и другой процессъ подраздѣляются на два періода.

Въ первомъ періодѣ идетъ очищеніе металла, во второмъ же, очень короткомъ, ему точно придается желаемый составъ. При этомъ главнымъ образомъ вводится углеродъ, для того чтобы довести его процентное содержаніе въ желѣзѣ до желаемаго предѣла; съ тою же цѣлью, а также и для того, чтобы удалить изъ желѣза поглощенный кислородъ, вводится извѣстное количество марганца.

При тигельномъ процессѣ очень небольшое количество сварочнаго желѣза или стали расплавляется въ закрытомъ тиглѣ и затѣмъ идетъ на отливку болванокъ или иныхъ издѣлій. Желаемаго процентнаго содержанія углерода достигаютъ 1) предварительной цементаціей твердаго металла путемъ очень продолжительнаго нагрѣванія его въ соприкосновеніи съ древеснымъ углемъ; или 2) прибавленіемъ древеснаго угля или чугуна при расплавленіи въ тиглѣ. Такимъ образомъ, при тигельномъ процессѣ металлъ попросту переплавляется, при чемъ, если надо, содержаніе въ немъ углерода можетъ быть повышено, пудлинговый же и бессемеровскій процессы направлены къ очищенію металла и этимъ рѣзко отличаются отъ тигельнаго процесса. Мартеновскій же процессъ можетъ служить или главнымъ образомъ для переплавленія (чугунъ и обрѣзки), или для очищенія (чугунъ и руда) или для того и другого вмѣстѣ (чугунъ, обрѣзки и руда).

268) Классификація процессовъ.—Наиболѣе важные процессы можно классифицировать слѣдующимъ образомъ:

1) Процессы извлеченія: доменный процессъ и процессы непосредственнаго изготовленія стали или сварочнаго желѣза изъ руды; послѣдніе въ настоящее время не имѣютъ значенія.

2) Процессы переработки или очищенія: бессемеровскій, мартеновскій и пудлинговый процессы. Процессъ Bell—Krupp представляетъ собой процессъ неполнаго очищенія. Очищеніе состоитъ главнымъ образомъ въ удаленіи при помощи окисленія избытка углерода, кремнія, фосфора и марганца, введенныхъ при доменномъ процессѣ.

3) Процессы, направленные къ точному приданію желаемаго состава.

Къ этимъ процессамъ принадлежатъ процессы цементаціи и процессы Harvey и Krupp; кромѣ того процессъ изготовленія ковкаго чугуна.

4) Процессы, направленные къ приданію желаемой формы.

Къ этимъ процессамъ принадлежатъ процессы механической обработки, прокатка, проковка, волоченіе проволоки и т. д. и процессы переплавленія, а именно изготовленіе чугунныхъ отливокъ и тигельный процессъ. Сюда же можно съ одной точки зрѣнія отнести и ту разновидность мартеновскаго процесса, при которой чугунъ сплавляется съ стальными обрѣзками.

Подобныя классификаціи въ рѣдкихъ случаяхъ могутъ быть полны и примѣняться въ то же время безъ оговорокъ. Такъ, напримѣръ, тигельный процессъ, какъ онъ ведется въ Великобританіи, представляетъ собой по существу процессъ переплавленія, въ Соединенныхъ-же Штатахъ онъ служитъ какъ для переплавленія, такъ для цементаціи.

Тѣмъ не менѣе такія классификаціи приносятъ извѣстную долю пользы.

Извлеченіе желѣза изъ руды.

269) Доменный процессъ.—Въ настоящее время можно сказать, что вся добываемая желѣзная руда выплавляется въ доменныхъ печахъ, при чемъ получается чугунъ. Далѣе уже чугунъ поступаетъ или прямо для отливокъ, или для передѣлки его въ сварочное желѣзо или сталь. Правда, существуетъ большое число процессовъ, при помощи которыхъ возможно непосредственно получать желѣзо и сталь изъ руды, не переводя ее предварительно въ чугунъ; при этомъ избѣгается введеніе углерода и кремнія въ большемъ количествѣ, чѣмъ это допустимо въ конечныхъ продуктахъ, и удаленіе ихъ, сопряженное съ большими расходами. Но эти процессы теперь имѣютъ почти только историческій и научный интересъ. За послѣднія десятилѣтія они были совершенно оставлены вслѣдствіе большого удешевленія, достигнутаго въ доменномъ процессѣ. Правда, небольшое количество руды требуется для пудлинговаго и мартеновскаго процессовъ, при чемъ часть желѣза изъ этой руды извлекается. Но количество руды, требуемое для этой цѣли, совершенно ничтожно съ тѣмъ, которое перерабатывается въ доменныхъ печахъ.

Доменный процессъ обладаетъ тѣмъ очень большимъ преимуществомъ надъ процессами непосредственнаго полученія сварочнаго желѣза и стали изъ руды, что при немъ извлекается

изъ руды почти все желѣзо и что продукты, чугунъ и шлакъ получаются въ расплавленномъ состоянiи, а не въ твердомъ или тѣстообразномъ. Послѣднее обстоятельство сильно удешевляетъ всѣ остальныя операцiи. Трудно себѣ представить, какъ этого можно было бы достигнуть при помощи какого либо процесса, при которомъ желѣзо или сталь добывались бы непосредственно изъ руды.

Преимущества доменнаго процесса настолько велики, что всѣ процессы непосредственно полученiя желѣза и стали изъ руды прекратили свое существованiе и едва ли будутъ въ состоянiи вновь возродиться. Развѣ только удастся ввести измѣненiе въ доменномъ процессѣ, которое сдѣлаетъ возможнымъ полученiе продукта болѣе близкаго по составу къ стали, т. е. съ меньшимъ содержанiемъ углерода и кремнiя, чѣмъ въ получаемомъ въ настоящее время чугунѣ.

Камнемъ преткновенiя для выработки такого измѣненiя является необходимость удаленiя сѣры, чрезвычайно вреднаго элемента, содержащагося обыкновенно въ рудахъ въ большемъ количествѣ, чѣмъ это допустимо въ стали. При процессахъ переработки чугуна въ сталь удаленiе фосфора достигается теперь безъ труда, удаленiе же сѣры представляетъ огромныя затрудненiя, и поэтому оно должно быть необходимо доведено почти до конца при доменномъ процессѣ. А какъ достигнуть удаленiя сѣры при доменномъ процессѣ безъ введенiя большого количества углерода и кремнiя въ чугунъ, мы не можемъ себѣ представить.

Большое удешевленiе въ доменный процессъ внесли механическiя приспособленiя для подачи и засыпки руды, флюса и топлива и для тѣхъ операцiй, которымъ чугунъ подвергается по выпускѣ изъ домны. Кромѣ того, удешевленiю способствовало улучшенiе защиты внутреннихъ стѣнокъ печи путемъ болѣе дѣйствительнаго охлажденiя ихъ водой, а также громадное повышенiе производительности печей, вызванное примѣненiемъ аппаратовъ для подогрѣванiя дутья и мощныхъ воздуходувныхъ машинъ. Но важнѣе и замѣчательнѣе всего, пожалуй, это успѣхъ, достигнутый за послѣднее время въ области примѣненiя колошниковыхъ газовъ для приведенiя въ дѣйствiе газовыхъ двигателей. Разсмотримъ всѣ эти обстоятельства по порядку.

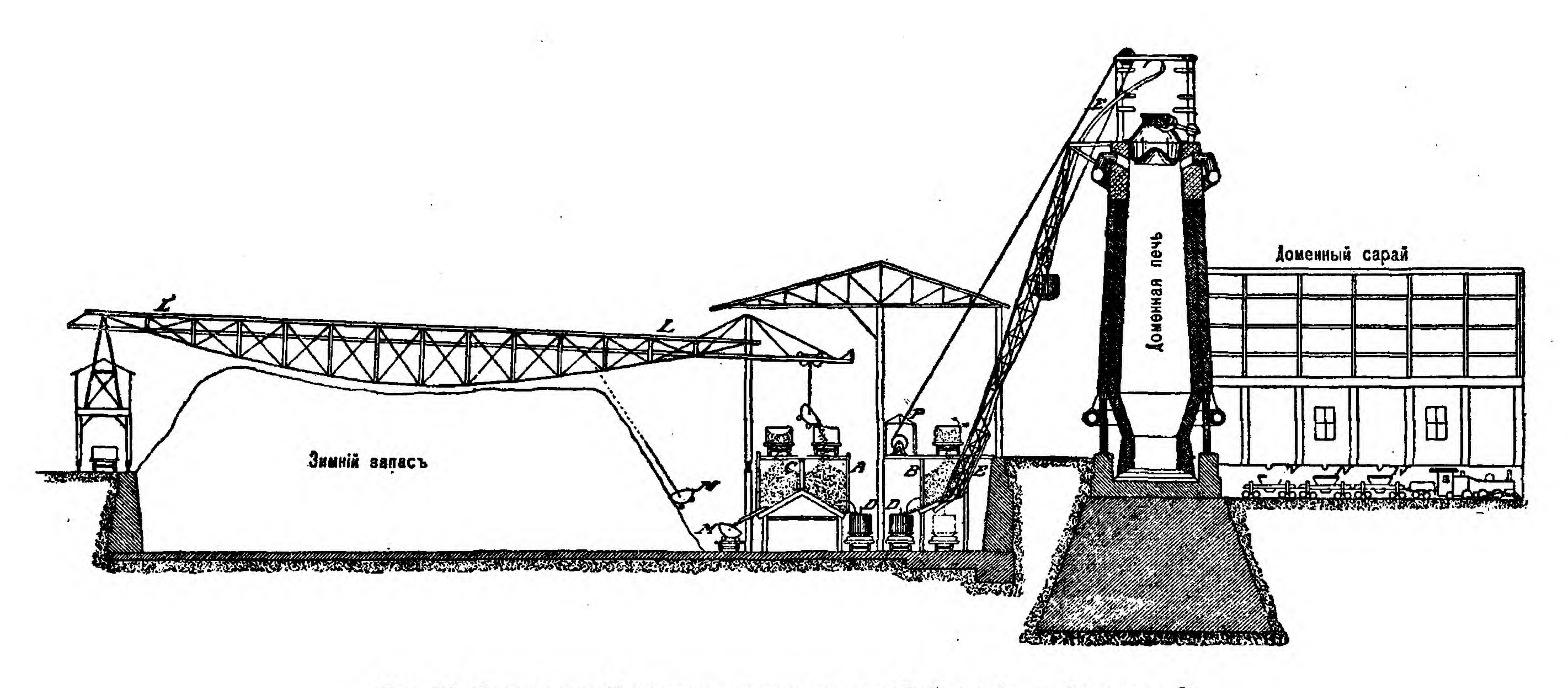


Рис. 88. Схематическій чертежъ доменныхъ печей Carnegie въ Duquesne, *Pa.*

A и *B*—лари для матеріаловъ, тотчасъ поступающихъ въ дѣло; *C* — ларь для зимняго запаса; *DD*—бадья для руды; *EE*—подъемный аппаратъ; *F*—помѣщеніе для машины, приводящей въ дѣйствіе подъемный аппаратъ; *L'L*—кранъ надъ зимнимъ запасомъ; *M*—бадья, подающая руду для зимняго запаса; *M'*—бадья, берущая руду изъ зимняго запаса; *N*, *N*, *N*,—ковши, въ которыхъ жидкій чугунъ подвозится къ бессемеровскимъ конвертерамъ и т. д.

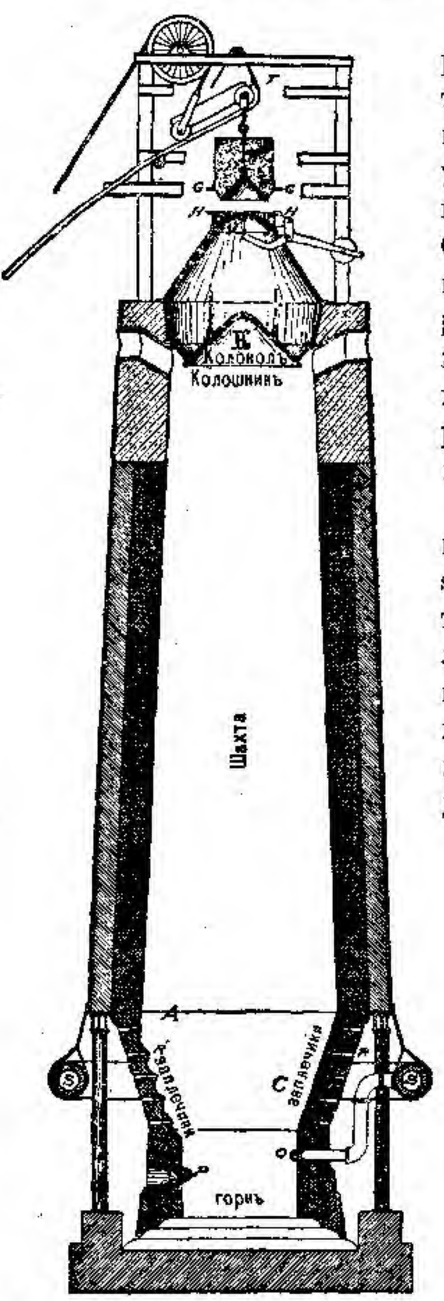


Рис. 89. Доменная печь въ Duquesne, въ разрѣзѣ.

GG—фланцы на бадьѣ для руды; *HH*—неподвижные фланцы на верху печи; *J*—уравновѣшенный колоколъ; *K*—главный колоколъ; *O*—фурма; *P*—шлаковое отверстіе; *R*, *R'* — коробки, охлаждаемыя водой; *S*—труба, черезъ которую поступаетъ дутье.

270) Подача и засыпка сырыхъ матеріаловъ.—При проектированіи новыхъ заводовъ ручная засыпка сырыхъ матеріаловъ уже болѣе никогда не имѣется въ виду, по крайней мѣрѣ въ Соединенныхъ Штатахъ. Установка на заводахъ Carnegie Company въ Duquesne (фиг. 88) можетъ служить примѣромъ современныхъ методовъ засыпки сырыхъ матеріаловъ въ доменную печь.

Вагонетки, которыя доставляютъ руду и коксъ въ Duquesne, проходятъ надъ однимъ изъ трехъ очень длинныхъ рядовъ ларей *A*, *B* и *C* (рис. 88), изъ которыхъ въ *A* и *B* поступаютъ матеріалы (руда, коксъ и известнякъ), немедленно идущіе въ дѣло, въ *C*—матеріалы для зим-

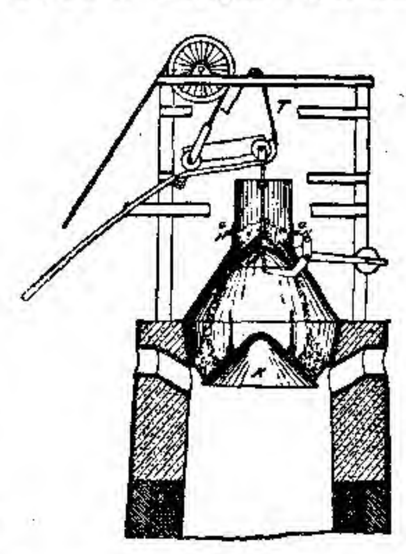


Рис. 90. Подача руды изъ бадьи въ главный загрузочный колоколъ.

Обозначенія, какъ на рис. 89.

няго запаса. Изъ A и B матеріалы, по мѣрѣ надобности, поступаютъ въ большія бадьи (D), помѣщающіяся на вагонеткахъ, на которыхъ онѣ перевозятся къ подножію подъемнаго аппарата, EE, и затѣмъ поднимаются при помощи послѣдняго на верхъ домны.

При засыпкѣ матеріаловъ въ доменную печь, особое, очень остроумное, приспособленіе препятствуетъ колошниковымъ газамъ вырываться изъ нея.

Какъ только лицу, управляющему подъемнымъ аппаратомъ, помѣщающемуся въ домикѣ F у подножія печи, особый приборъ укажетъ, что бадья поднялась до верха домны, онъ опускаетъ ее до тѣхъ поръ, пока она своими флянцами (GG фиг. 89) не ляжетъ на соотвѣтствующіе неподвижные флянцы HH (фиг. 90).

Такимъ образомъ, бадья не можетъ болѣе опускаться. Послѣ этого ослабляется кабель T, коническое дно бадьи опускается и нажимаетъ на уравновѣшенную крышку (J) печи. Вслѣдствіе этого содержимое бадьи ссыпается въ промежутокъ между этой крышкой и колоколомъ K. Затѣмъ, натягивая кабель T, поднимаютъ дно бадьи, вслѣдствіе чего крышка J занимаетъ прежнее положеніе, и пространство между J и K вновь оказывается замкнутымъ. Послѣ этого бадья спускается по подъемному аппарату внизъ и новая поднимается на ея мѣсто; K въ это время опускается и матеріалы поступаютъ въ печь.

Итакъ, засыпка совершается чисто-механическимъ путемъ. Силою тяжести матеріалъ поступаетъ изъ ларя въ бадью, затѣмъ изъ бадьи въ печь, при чемъ подъемомъ и загрузкой завѣдуетъ только одинъ человѣкъ, находящійся внизу. Наверху весь этотъ процессъ не требуетъ никакого наблюденія или помощи со стороны другихъ лицъ.

Зимній запасъ матеріаловъ, поступая изъ ларей C, распредѣляется при помощи большого подвижного крана LL и образуетъ цѣлыя горы. Зимою, по мѣрѣ надобности матеріалы передаются тѣмъ же краномъ въ лари A и засыпаются въ домну вышеописаннымъ образомъ.

271) Чугунъ по выпускѣ изъ домны. — Много труда было сохранено введеніемъ машинъ для дробленія чугунныхъ свинокъ. Цѣлый рядъ свинокъ, соединенныхъ между собой, поднимается изъ формъ подвижнымъ краномъ и помѣщается на катки. При помощи послѣднихъ, свинки одна за другой подводятся подъ

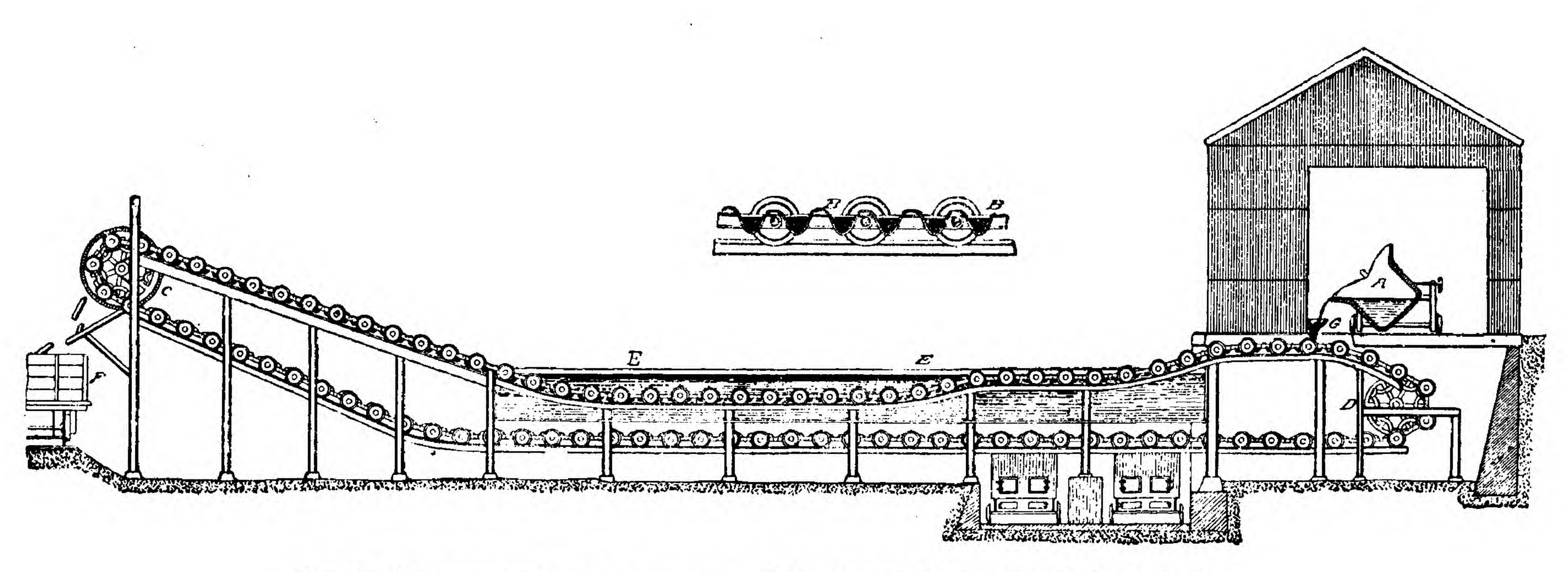


Рис. 91. Схематическій чертежъ аппарата Uehling'а для отливки чугуна въ свинки.

A—ковшъ, въ которомъ привозится чугунъ отъ доменной печи; *BB*—изложницы; *C*, *D*,—шкивы, приводящіе въ движеніе безконечную цѣпь съ изложницами; *EE*—бакъ, въ который погружаются изложницы; *F*—вагонъ, въ который падаютъ охладившіяся свинки; *G*—распредѣлительная воронка.

гидравлическій прессъ съ тремя выступами, изъ которыхъ одинъ служитъ для того, чтобы разбивать соединеніе между данной свинкой и сосѣдней съ нею, другіе же два для того, чтобы разбивать свинку на три куска. Куски затѣмъ падаютъ въ стоящій внизу вагонъ. Еще большее удешевленіе достигается приспособленіемъ для отливки Uehling'a (рис. 91), которое въ существенныхъ чертахъ состоитъ въ слѣдующемъ.

Цѣлый рядъ тонкихъ стальныхъ изложницъ *BB*, укрѣпленныхъ на безконечныхъ цѣпяхъ, проходитъ передъ носкомъ большого ковша *A*. Въ этотъ ковшъ чугунъ поступаетъ прямо изъ домны и затѣмъ разливается въ упомянутыя изложницы. По мѣрѣ того, какъ эти изложницы передвигаются, происходитъ затвердѣваніе и охлажденіе свинокъ, которое ускоряется еще тѣмъ, что ихъ поливаютъ водой или пропускаютъ черезъ бакъ, наполненный водой. Достигнувъ барабана *C*, сравнительно уже холодныя свинки падаютъ въ желѣзнодорожный вагонъ. Такое приспособленіе хотя и сохраняетъ много труда, но это уравновѣшивается стоимостью ремонта.

Большую цѣнность этому приспособленію придаетъ другое обстоятельство, а именно то, что онъ уничтожаетъ зависимость отъ рабочихъ, которые нужны для разбиванія свинокъ въ-ручную. Эти рабочіе совершенно необходимы при каждомъ выпускѣ чугуна изъ домны, потому что удаленіе его должно происходить очень быстро, для того чтобы дать мѣсто новому. Замѣна же ихъ крайне затруднительна, такъ какъ эта работа требуетъ громадной физической выносливости.

272) Защита стѣнокъ доменной печи.—Во время работы печи, футеровка (облицовка) ея частью разъѣдается, частью снашивается, въ особенности въ нижней, наиболѣе горячей части; это вызываетъ измѣненіе формы печи, понижаетъ ея производительность и, въ частности, увеличиваетъ расходъ горючаго матеріала. Вслѣдствіе этого стѣнки печи дѣлаются въ настоящее время тонкими и очень хорошо охлаждаются водой, циркулирующей по заложеннымъ въ нихъ трубамъ или коробкамъ. Система охлажденія James Gayley, представленная въ маломъ масштабѣ на фиг. 89 и болѣе подробно на фиг. 92, состоитъ въ томъ, что въ кирпичную кладку стѣнокъ домны закладываютъ въ нѣсколько рядовъ плоскія, охлаждаемыя водой, бронзовыя коробки *RR'*; эти коробки почти достигаютъ внутрен-

ней части печи и дѣлаются такимъ образомъ, что ихъ можно легко извлечь въ томъ случаѣ, если бы онѣ прогорѣли. Футеровка можетъ сноситься до передняго края этихъ коробокъ и даже нѣсколько дальше, какъ указано на фиг. 89 R', такъ что между горизонтальными рядами коробокъ въ стѣнкахъ образуются кольцеобразныя углубленія. Но даже и въ этомъ случаѣ дѣйствительный профиль стѣнокъ опредѣляется передними краями

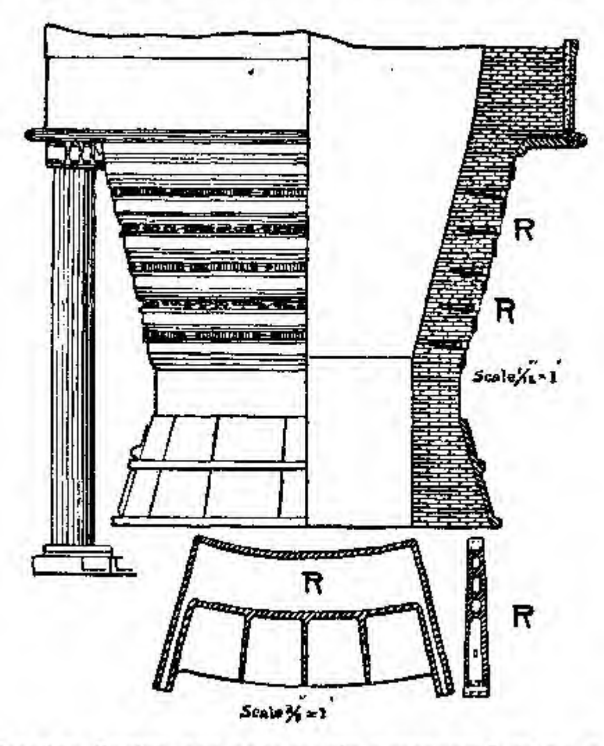


Рис. 92. Коробки Gayley, для охлажденія внутренней стороны стѣнокъ доменной печи.

(«Trans. Am. Inst. Min. Eng.», XXI, стр. 109, рис. 8).

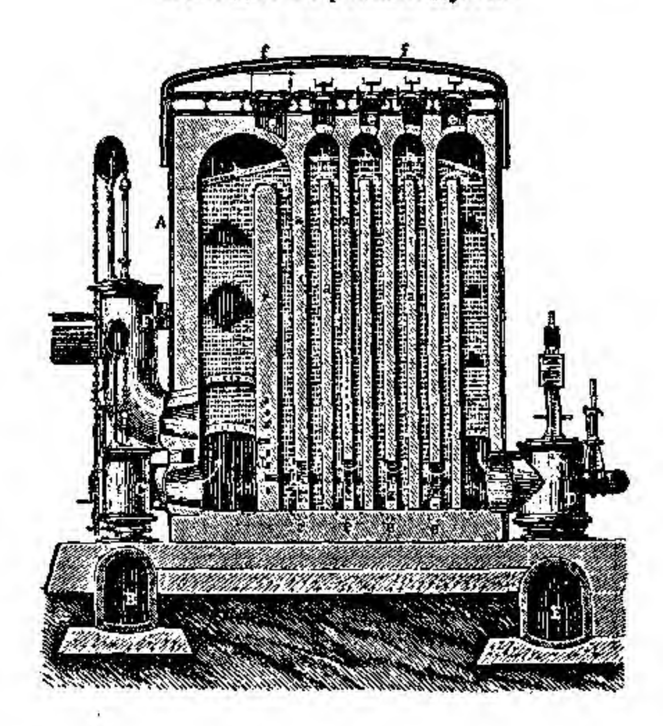
коробокъ, потому что эти углубленія заполняются углемъ и шлакомъ при нормальной работѣ печи. Каждый изъ этихъ рядовъ, изъ которыхъ на фиг. 89 указано пять, состоитъ изъ большого числа короткихъ коробокъ.

273) Машины, работающія доменнымъ газомъ.—Газы, выходящіе изъ доменной печи, обыкновенно содержатъ отъ 20 до 26% окиси углерода и поэтому представляютъ собой очень цѣнное топливо. До недавняго времени ими пользовались глав-

нымъ образомъ для нагрѣванія дутья и для топки паровыхъ котловъ, служащихъ для приведенія въ дѣйствіе воздуходувной машины, прокатныхъ становъ и другихъ механизмовъ. Но въ настоящее время убѣдились въ томъ, что при непосредственномъ использованіи этихъ газовъ въ газовыхъ двигателяхъ можно получить почти въ четыре раза больше энергіи, при сгораніи того же количества газовъ подъ паровымъ котломъ. Было вычислено, что газъ, получающійся отъ двухъ старой конструкціи доменныхъ печей, производящихъ 1,600 тоннъ чугуна въ недѣлю, можетъ дать 16,000 лошадиныхъ силъ сверхъ той энергіи, которая требуется для работы этихъ печей. Согласно этому, двѣ большія американскія доменныя печи могутъ служить источникомъ около 70,000 лошадиныхъ силъ сверхъ той энергіи, которая идетъ для обслуживанія ихъ собственныхъ механическихъ приспособленій и для нагрѣванія дутья. Хотя, быть можетъ, это число въ дѣйствительности и много ниже, такъ какъ, благодаря лучшей утилизаціи топлива въ этихъ печахъ, получаются газы болѣе бѣдные окисью углерода, все же ясно, что значеніе ихъ, какъ источниковъ энергіи очень велико. Повидимому, примѣненіе газовыхъ двигателей поведетъ къ очень важнымъ результатамъ.

При пользованіи энергіей доменнаго газа слѣдуетъ располагать въ непосредственной близости отъ доменныхъ печей тѣ зданія, гдѣ ведется переработка чугуна на сталь и гдѣ этой стали окончательная форма придается прокаткой. На тѣ многочисленные заводы, которые перерабатываютъ чугунъ, доставляемый со стороны, теперь ляжетъ тяжелое бремя получать инымъ путемъ энергію, которую ихъ конкуренты получаютъ отъ доменныхъ печей. Къ этому присоединяется еще та большая невыгода, отъ которой они уже страдаютъ, что даромъ пропадаетъ тепло чугуна по выпускѣ его изъ домны.

274) Печи для нагрѣванія дутья.—Печи для нагрѣванія дутья, основанныя на томъ, что воздухъ проходитъ черезъ цѣлый рядъ чугунныхъ трубъ, вокругъ которыхъ происходитъ сгораніе доменныхъ газовъ, быстро выходятъ изъ употребленія, главнымъ образомъ потому, что трубы очень скоро разрушаются при попыткѣ поднять температуру дутья выше 538°Ц. Вмѣсто нихъ главнымъ образомъ примѣняются печи типа Whitwell (рис. 93 и 94) и Cowper (рис. 95). При этихъ печахъ, на нѣ-



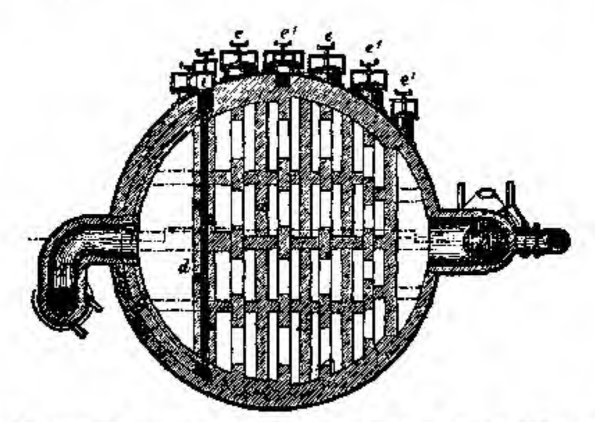


Рис. 93. Ранній типъ печи для нагрѣванія дутья, Whitwell'я.
(Ledebur, «Handbuch der Eisenhüttenkunde», 3 изд. 1899, стр. 468).

которыхъ заводахъ дутье имѣетъ температуру около 760°Ц., обычно же температура его составляетъ 480°—650°Ц.

Принципъ, на которомъ основаны эти печи, тотъ же, что и у печей Сименса. Сперва часть доменнаго газа сгораетъ въ печи, сильно нагрѣвая большую поверхность кирпичныхъ клѣтокъ,

затѣмъ черезъ печь пускается воздухъ, который нагрѣвается, приходя въ соприкосновеніе съ клѣтками. Эти печи представляютъ собой какъ бы фильтры или ловушки, которые задерживаютъ тепло, развивающееся при горѣніи доменныхъ газовъ, и отдаютъ его затѣмъ дутью. Каждую доменную печь въ настоящее время снабжаютъ тремя или даже четырьмя такими печами, которыя въ совокупности могутъ обладать почти въ три раза большимъ объемомъ, чѣмъ сама печь. Печи функціонируютъ такимъ образомъ, что, пока одна отдаетъ тепло дутью, другія въ это время нагрѣваются горящимъ газомъ.

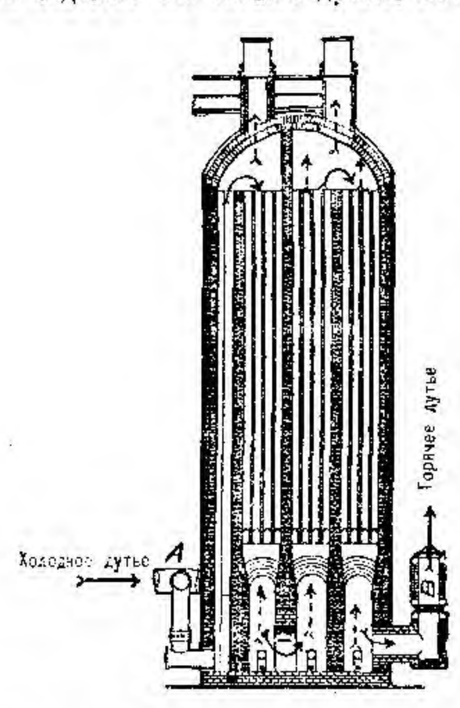


Рис. 94. Печь для нагрѣванія дутья H. Kennedy (Типа печи Whitwell'я).

Примѣчаніе: Холодное дутье поступаетъ въ *A*, проходитъ вверхъ и внизъ четыре раза, какъ показываютъ сплошныя стрѣлки, и выходитъ въ видѣ горячаго дутья въ *B*.

Въ слѣдующемъ періодѣ газъ и воздухъ поступаютъ въ нижнюю часть каждой изъ трехъ вертикальныхъ камеръ, проходятъ одинъ разъ вверхъ черезъ печь и уходятъ черезъ верхнюю ея часть, какъ указано пунктирными стрѣлками.

«Trans. Am. Inst. Min. Eng.» XXI, стр. 772, 1893.

Впослѣдствіи печи Whitwell'я были упрощены, ихъ стали дѣлать длиннѣе, и число внутреннихъ перегородокъ было сведено съ девяти до трехъ; благодаря этому, какъ газъ, такъ и дутье при прохожденіи должны мѣнять свое направленіе вмѣсто девяти только три раза. Это уменьшаетъ треніе и облегчаетъ работу воздуходувной машины. Требуемой поверхности нагрѣва достигаютъ, дѣлая три длинныхъ перегородки вмѣсто девяти короткихъ.

Рис. 93 изображаетъ ранній типъ аппарата Whitwell'я. Газъ и воздухъ, предназначенные для горѣнія, поступаютъ въ нижнюю часть находящейся съ лѣвой стороны вертикальной камеры, которая дѣлается достаточно обширной для того, чтобы достигалось полное смѣшеніе и сгораніе. Отсюда, какъ показано стрѣлками, продукты горѣнія идутъ вверхъ и внизъ по верти-

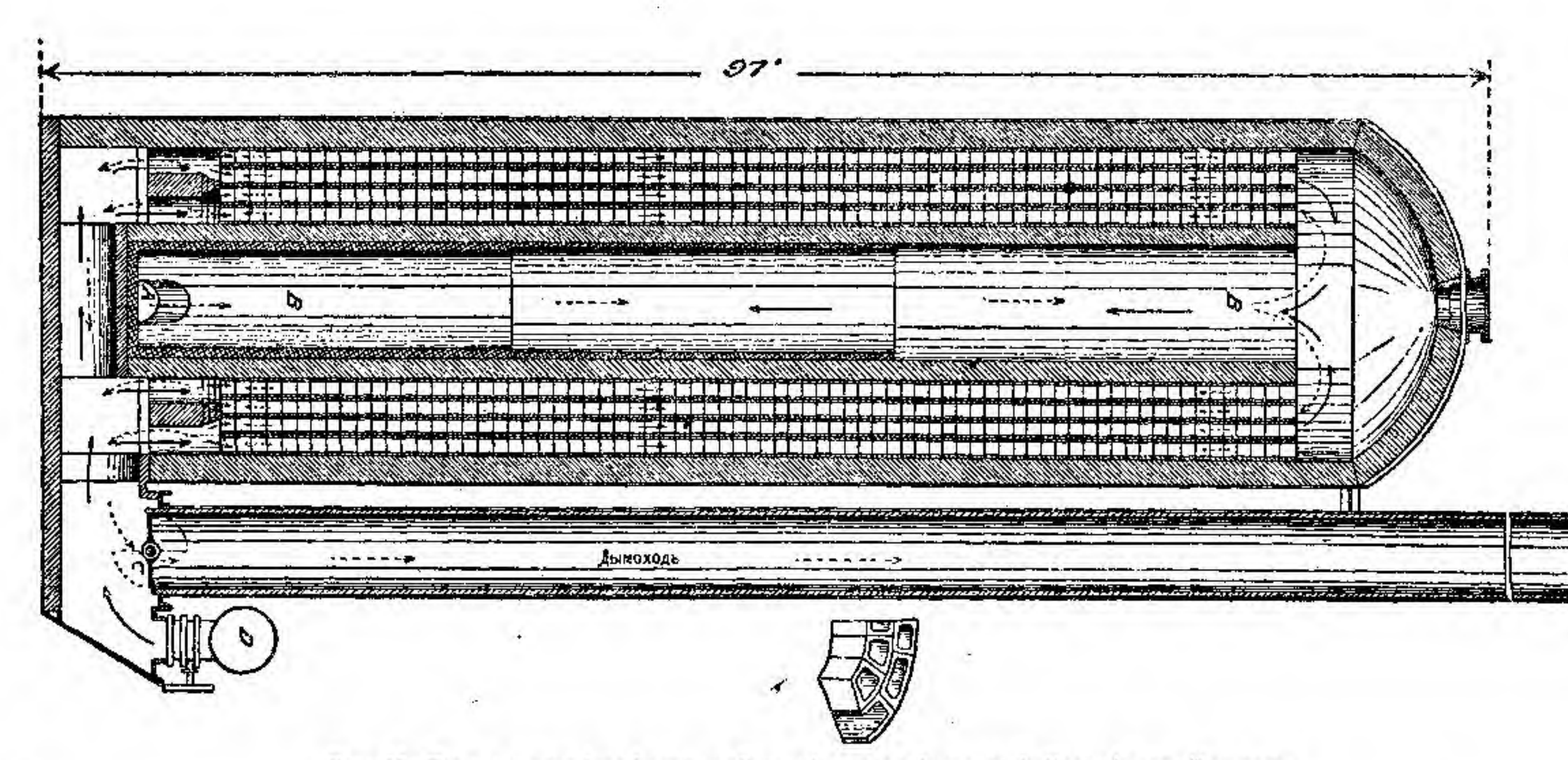


Рис. 95. Печь для нагрѣванія дутья Cowper'a, видоизмѣненная J. Kennedy, въ Duquesne.

A—отверстіе, въ которое поступаютъ колошниковые газы; *BB*—камера, гдѣ происходитъ горѣніе; *C*—клапанъ; *D*—труба, по которой поступаетъ дутье. Пунктирныя стрѣлки указываютъ путь газа и воздуха въ одномъ періодѣ работы печи, сплошныя стрѣлки путь дутья въ слѣдующемъ періодѣ.

кальнымъ ходамъ, находящимся справа отъ камеры, гдѣ происходитъ сгораніе, и отдаютъ тепло кирпичнымъ перегородкамъ. Въ слѣдующій періодъ холодное дутье направляется въ правую часть аппарата, проходитъ въ обратномъ направленіи и, отнимая тепло отъ перегородокъ, выходитъ изъ лѣвой части аппарата уже въ видѣ горячаго дутья.

Рис. 94 даетъ понятіе о современномъ типѣ аппарата Whitwell'я, а также и о имѣющемъ много общаго съ нимъ аппаратѣ Hugh Kennedy. У современнаго аппарата Whitwell'я отсутствуютъ трубы, изображенныя на рис. 94; кромѣ того, камера слѣва, гдѣ происходитъ сгораніе газа, дѣлается широкой, а не узкой, какъ это здѣсь представлено.

Аппаратъ Hugh Kennedy, изображенный на рис. 94, представляетъ собой остроумное видоизмѣненіе прежнихъ аппаратовъ. Объясненіе его дѣйствія дано при рисункѣ.

Аппаратъ Cowper'а (рис. 95) отличается отъ аппарата Whitwell'я (рис. 94) тѣмъ 1) что онъ состоитъ не изъ ряда плоскихъ гладкихъ перегородокъ, а изъ большого числа узкихъ вертикальныхъ каналовъ, служащихъ попеременно для поглощенія и отдачи тепла, вслѣдствіе чего аппаратъ Cowper'а при одинаковомъ внѣшнемъ размѣрѣ обладаетъ на половину большей поверхностью нагрѣва, чѣмъ аппаратъ Whitwell'я; тѣмъ 2) что газъ и дутье проходятъ черезъ него только одинъ разъ вверхъ и одинъ разъ внизъ, а не по два раза вверхъ и внизъ, какъ въ современныхъ аппаратахъ Whitwell'я. Что касается до тренія, то малый просвѣтъ каналовъ искупается меньшимъ числомъ перемѣнъ направленія при проходѣ газовъ и дутья. Большой размѣръ камеры *B* гарантируетъ полное сгораніе газа.

275) Увеличеніе производительности доменныхъ печей достигло чрезвычайной степени. Въ 1863 г. суточная производительность въ 50 тоннъ, а въ 1880 г. въ 115 тоннъ для одной доменной печи считалась необыкновенно большой. Но уже въ 1898 г. одна доменная печь въ Duquesne производила въ сутки 711 тоннъ, четыре же такихъ печи производили въ сутки регулярно отъ 2.200 до 2.300 тоннъ. Годовая производительность этихъ четырехъ печей равнялась міровой производительности въ 1800 г. и половинѣ производительности всѣхъ доменныхъ печей въ Соединенныхъ Штатахъ въ 1870 г. Въ Rankin одна доменная печь за сутки выплавила 790 тоннъ чугуна. Произ-

водительность такой печи много превышаетъ производительность всѣхъ печей въ Соединенныхъ Штатахъ въ 1830 г., почти въ десять разъ больше производительности ихъ въ 1820 г. и почти въ четыре раза превышаетъ производительность 153 доменныхъ печей въ Соединенныхъ Штатахъ въ 1810 г. (поздн. свѣд.— доменная печь Ohio № 2 въ Youngstown, Ohio, дала за сутки 806 тоннъ бессемеровскаго чугуна).

Конечно, эти доменныя печи Carnegie являются исключеніемъ, такъ какъ обычная производительность доменныхъ печей, особенно европейскихъ, гораздо меньше. Такъ, напримѣръ, въ 1899 г. средняя суточная производительность одной печи, вычисленная на основаніи данныхъ для 85 существующихъ и проектированныхъ печей въ Лотарингіи и Люксембургѣ, оказалась равной только 127 тоннамъ, наибольшая же производительность строившихся печей должна была достигать только 200 тоннъ. Само собой, большой вопросъ, оказалось ли бы выгоднымъ вести переработку тощихъ рудъ Люксембурга и Лотарингіи съ такою же быстротою, какъ богатыхъ рудъ Верхняго Озера въ Duquesne.

Замѣчательное увеличеніе производительности доменныхъ печей съ 1880 г. было достигнуто не столько путемъ увеличенія ихъ размѣра, хотя горнъ и дѣлается теперь нѣсколько больше, чѣмъ прежде, но главнымъ образомъ путемъ примѣненія мощныхъ воздуходувныхъ машинъ и нагрѣвательныхъ аппаратовъ для дутья. А это въ свою очередь заставило ввести механическія приспособленія для подачи сырыхъ матеріаловъ и для удаленія продуктовъ доменнаго процесса.

Между 1880 и 1901 гг. значеніе антрацита, какъ топлива для выплавки чугуна, сильно уменьшилось, древеснаго же угля и того болѣе. Такъ, процентъ чугуна, выплавленнаго въ Соед. Штатахъ на антрацитѣ, за этотъ періодъ упалъ съ 42 до 11, на древесномъ углѣ съ 13 до 2.

Переработка чугуна на сварочное желѣзо и сталь.

276) Производство сварочнаго желѣза.—Очень обширное примѣненіе сварочнаго желѣза, которому еще въ 1880 г. грозило полное вытѣсненіе мягкой сталью, объясняется главнымъ образомъ 1) консерватизмомъ, часто разумнымъ, потребителей, 2) боль-

шою легкостью, съ которою сварочное желѣзо сваривается и 3) легкостью, съ которою оно поддается очисткѣ. Изъ сварочнаго желѣза въ большомъ количествѣ изготовляются подковы, бруски и т. п. для сельскихъ кузнецовъ и вообще тѣхъ, которые не имѣли возможности изучить той нѣсколько иной обработки, которой требуетъ мягкая сталь. Сваренныя трубы для пара, газа и воды точно также часто дѣлаются изъ сварочнаго желѣза, а не изъ стали, потому что въ этомъ случаѣ способность очень хорошо свариваться имѣетъ большое значенiе; кромѣ того еще и потому, что при изготовленiи хорошо сваривающейся стали, т. е. содержащей мало углерода, приходится прибѣгать къ особымъ мѣрамъ для того, чтобы избѣжать «газовыхъ пузырей» (см. § 294), возникающихъ вслѣдствiе выдѣленiя газа при затвердѣванiи болванокъ, въ которыя сталь первоначально отливается. Эти пузыри могутъ съ одной стороны усиливать вредное явленiе ржавленiя, вызывая въ трубкахъ образованiе отверстiй, съ другой стороны они могутъ ослаблять прочность нарѣзки, которой снабжаются концы трубокъ.

При тигельномъ процессѣ, въ качествѣ матерiала для выдѣлки болѣе высокихъ сортовъ инструментальной стали, сварочное желѣзо предпочитаютъ мягкой стали, какъ потому, что по сравненiю съ мягкой сталью оно можетъ быть получено съ меньшимъ содержанiемъ нѣкоторыхъ элементовъ, въ особенности марганца, здѣсь нежелательныхъ, такъ и потому, что тигельная сталь, полученная изъ сварочнаго желѣза, по мнѣнiю лучшихъ знатоковъ, обладаетъ болѣе высокимъ качествомъ, чѣмъ полученная изъ мягкой стали, хотя бы и одинаковой по составу съ сварочнымъ желѣзомъ. Чѣмъ это вызывается, остается еще пока невыясненнымъ. Первой изъ вышеуказанныхъ причинъ и, быть можетъ, также присутствiемъ шлака объясняется и бóльшая тягучесть сварочнаго желѣза по сравненiю съ мягкой сталью. Благодаря этому, оно въ большомъ количествѣ идетъ на выдѣлку такихъ предметовъ, какъ подковные гвозди, заклепки и т. п.

Между 1870 г. и 1890 г. производство сварочнаго желѣза въ Соед. Штатахъ болѣе чѣмъ удвоилось, но затѣмъ вновь стало сильно сокращаться и теперь почти упало до уровня 1870 г. За перiодъ 1870—1900 г. отношенiе между количествомъ производимаго сварочнаго желѣза и стали очень сильно уменьшилось.

Такъ, изъ общаго годичнаго производства сварочнаго желѣза и стали въ Соед. Штатахъ, производство сварочнаго желѣза составляло 95% въ 1870 г., 63% въ 1880 г., 37% въ 1890 г. и около 15% въ 1899 г. Соотвѣтствующія числа для Великобританіи: 34% въ 1890 г., 19% въ 1899 г. и 16% въ 1901 г. По имѣющимся свѣдѣніямъ за 1899 г., изъ существующихъ въ Великобританіи 1.320 пудлинговыхъ печей въ среднемъ было въ работѣ 1.149. Такимъ образомъ, за девятнадцать лѣтъ сварочное желѣзо потеряло свое первенствующее значеніе и стало продуктомъ второстепенной важности.

277) Пудлинговый процессъ.—Почти все сварочное желѣзо до сихъ поръ получается при помощи пудлинговаго процесса. Многочисленныя механическія пудлинговыя печи, которыя въ

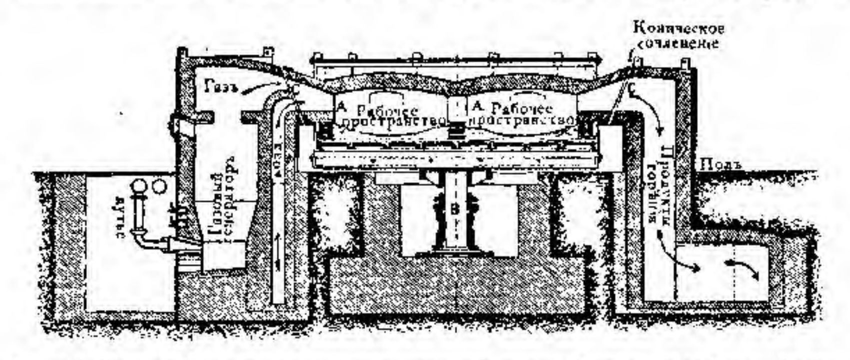


Рис. 96. Схематическій разрѣзъ пудлинговой печи, Pietzka Paddling Furnace.

1875 г., или около того времени, такъ усиленно старались ввести для того, чтобы облегчить чрезвычайно тяжелый трудъ рабочихъ, по большей части не привились, и даже печь Danxs почти совсѣмъ позабыта. Пудлингованіе теперь обычно ведется ручнымъ способомъ въ старомодныхъ печахъ, точно такимъ же образомъ, какъ и въ прежнее время. Слѣдуетъ указать только на слѣдующія новости въ пудлингованіи: 1) на пудлинговую печь, такъ называемую «Pietzca furnace», 2) на попытки увеличить загрузку и 3) на примѣненіе расплавленнаго чугуна непосредственно изъ доменной печи.

Въ начальномъ періодѣ пудлингованія, при расплавленіи чугуна, вещества сравнительно легкоплавкаго, требуется гораздо менѣе высокая температура, чѣмъ къ концу процесса, когда получающееся желѣзо требуетъ очень сильнаго нагрѣванія, для

того, чтобы зерна его плотно сварились между собою; высокая температура необходима также и для того, чтобы шлакъ былъ достаточно жидокъ и легко выдавливался изъ крицы. Это обстоятельство принято въ расчетъ при конструированіи пудлинговой печи «Pietzka furnace» (рис. 96). Она снабжена двумя рабочими пространствами, *A*, *A*; въ правомъ, гдѣ температура ниже, новая загрузка расплавляется и начинается пудлингованіе, тогда какъ въ лѣвомъ, находящемся ближе къ огню, гдѣ, слѣдовательно, температура выше, заканчивается пудлингованіе предыдущей загрузки. Вытащивъ изъ печи крицу и произведя необходимыя починки, рабочія камеры приподнимаютъ при помощи гидравлическаго поршня *B* и поворачиваютъ на 180°. Такимъ путемъ загрузка, обработка которой была начата въ менѣе горячей части печи, оказывается въ болѣе горячей ея части. Возможности такого поворачиванія можно достигнуть при помощи коническихъ сочлененій *C* между вращающимися частями печи и неподвижными. Тепло, которое при обыкновенной пудлинговой печи уходитъ изъ рабочаго пространства въ трубу и теряется, здѣсь утилизируется въ правой части печи для начальной стадіи процесса. Кромѣ того, тепло продуктовъ горѣнія можно также улавливать, при помощи регенеративной системы Сименса или же рекуперативной системы. При такомъ устройствѣ «Pietzka furnace» даетъ большую экономію въ топливѣ.

Обыкновенно чугунъ по выпускѣ изъ домны отливается въ свинки, которымъ затѣмъ даютъ вполнѣ охладиться. Затѣмъ эти свинки сортируютъ по излому и расплавляютъ въ самой пудлинговой печи. Для того чтобы избѣжать расхода на плавленіе свинокъ, въ Hourpes расплавленный чугунъ поступаетъ въ пудлинговую печь непосредственно изъ домны. При этомъ загрузка составляетъ около 2,200 фунтовъ, т. е. почти въ четыре раза больше, чѣмъ при обыкновенныхъ пудлинговыхъ печахъ. Пудлингованіе ведется двумя партіями, по четыре человѣка въ каждой. Ведя процессъ такимъ образомъ, достигаютъ большой экономіи въ топливѣ и работѣ.

Несмотря на весь интересъ, который представляютъ эти усовершенствованія въ пудлинговомъ процессѣ, они не нашли широкаго примѣненія. На это есть двѣ главныхъ причины: во-первыхъ, собственники заводовъ, гдѣ ведется пудлингованіе, не

желаютъ затрачивать денегъ на установки для процесса, будущее котораго такъ сомнительно; такое нежеланіе тѣмъ болѣе естественно, что эти люди въ большинствѣ принадлежатъ къ той болѣе консервативной части, которая не соблазнилась отказаться отъ пудлингованія и перейти къ выдѣлкѣ стали. Во-вторыхъ, въ пудлинговомъ желѣзѣ, примѣняемомъ какъ сырой матеріалъ для выдѣлки очень высокихъ сортовъ стали, при помощи тигельнаго процесса, качество играетъ самую важную роль. Имѣя же передъ собой рядъ процессовъ,—доменный, пудлинговый и тигельный,—чрезвычайно трудно установить, каковы тѣ существенныя условія, которыя необходимы для того, чтобы получить высокій по качеству конечный продуктъ. Поэтому, разъ установлено, что при данномъ способѣ получается прекрасная сталь, каждый болѣе осторожный мастеръ и будетъ его придерживаться во всѣхъ деталяхъ, часто съ удивительнымъ консерватизмомъ. Говорятъ, что покупатели нѣкоторыхъ очень высокихъ сортовъ шведскаго желѣза противились даже замѣнѣ водяной силы электричествомъ для приведенія въ дѣйствіе заводскихъ машинъ.

По отношенію къ пользованію расплавленнымъ чугуномъ, поступающимъ непосредственно изъ домны въ пудлинговую печь, и большихъ загрузокъ, такого рода консерватизмъ имѣетъ извѣстное основаніе; ибо гораздо легче разсортировать чугунъ по излому и отобрать неподходящій для пудлингованія, чѣмъ опредѣлить его качество въ то время, какъ онъ находится въ расплавленномъ состояніи.

Кромѣ того, при большихъ загрузкахъ отвѣтственными за веденіе процесса пудлингованія являются нѣсколько рабочихъ; вслѣдствіе этого отъ нихъ врядъ ли можно ожидать такого вниманія, какъ въ томъ случаѣ, когда отвѣтственнымъ является одинъ человѣкъ.

278) Мартеновскій процессъ.—Въ мартеновскомъ процессѣ за разсматриваемый промежутокъ времени были достигнуты болѣе важные успѣхи, чѣмъ во всѣхъ другихъ отрасляхъ производства стали. Главные изъ нихъ слѣдующіе: 1) широкое примѣненіе основного пода и основного шлака, благодаря чему удается удаленіе фосфора изъ желѣза; 2) большое увеличеніе размѣра печей; емкость ихъ возрасла съ 10 до 50 тоннъ и даже до 70 тоннъ; 3) примѣненіе «tilting furnaces» т. е. печей, кор-

пусъ плавильнаго пространства которыхъ можетъ быть наклоняемъ въ сторону выпускного отверстія; 4) нѣкоторые особенные способы веденія процесса.

Въ Соед. Штатахъ недѣльная производительность мартеновскихъ печей повысилась съ 6 плавокъ (въ общемъ составляющихъ 30 тоннъ) въ 1870 г. до 22 плавокъ (въ общемъ составляющихъ 1.129 тоннъ); послѣднее число относится къ производительности 50-ти-тонной печи въ Duquesne, при переработкѣ садокъ, состоящихъ изъ 34,3% расплавленнаго чугуна, 10,5% твердаго чугуна и 55,2% желѣзнаго лома.

Въ 1880 г. основной недостатокъ мартеновскаго процесса, точно такъ же, какъ и бессемеровскаго, заключался въ невозможности удалять фосфоръ,—элементъ, весьма вредно вліяющій на качество стали, и въ то же время почти всегда содержащійся въ чугунѣ въ большемъ количествѣ, чѣмъ это допустимо въ стали. Какъ мы уже видѣли, сущность какъ того, такъ и другого процессовъ состоитъ въ удаленіи при помощи окисленія углерода, кремнія, марганца и т. д., содержащихся въ расплавленномъ чугунѣ. Углеродъ окисляется въ углекислоту и выдѣляется въ видѣ газа. Кремній окисляется въ кремнекислоту, марганецъ въ закись марганца, при чемъ кремнекислота и закись марганца соединяются съ шлакомъ, плавающимъ въ видѣ тонкаго слоя на поверхности расплавленнаго металла.

На рис. 97 схематически представленъ ходъ процесса въ мартеновской печи. Правая часть рисунка изображаетъ расплавленную массу въ состояніи сильнаго кипѣнія, вызываемаго реакціей между кислородомъ желѣзной руды (темные куски, плавающіе между шлакомъ и расплавленнымъ металломъ) и углеродомъ расплавленнаго металла, $C + O = CO$. Образующаяся окись углерода выдѣляется въ видѣ большихъ пузырей и превращаетъ шлакъ въ толстую пѣнистую массу. Лѣвая часть рисунка изображаетъ массу къ концу процесса, когда кипѣніе почти совсѣмъ прекращается.

Конечно, приходится прибѣгать къ помощи воображенія, чтобы составить себѣ представленіе о томъ, что̀ происходитъ внутри подобной непрозрачной массы.

Фосфоръ, подобно углероду, кремнію и марганцу, также можетъ быть окисленъ при помощи окиси желѣза; при этомъ образуется фосфорная кислота, которая выдѣляется изъ рас-

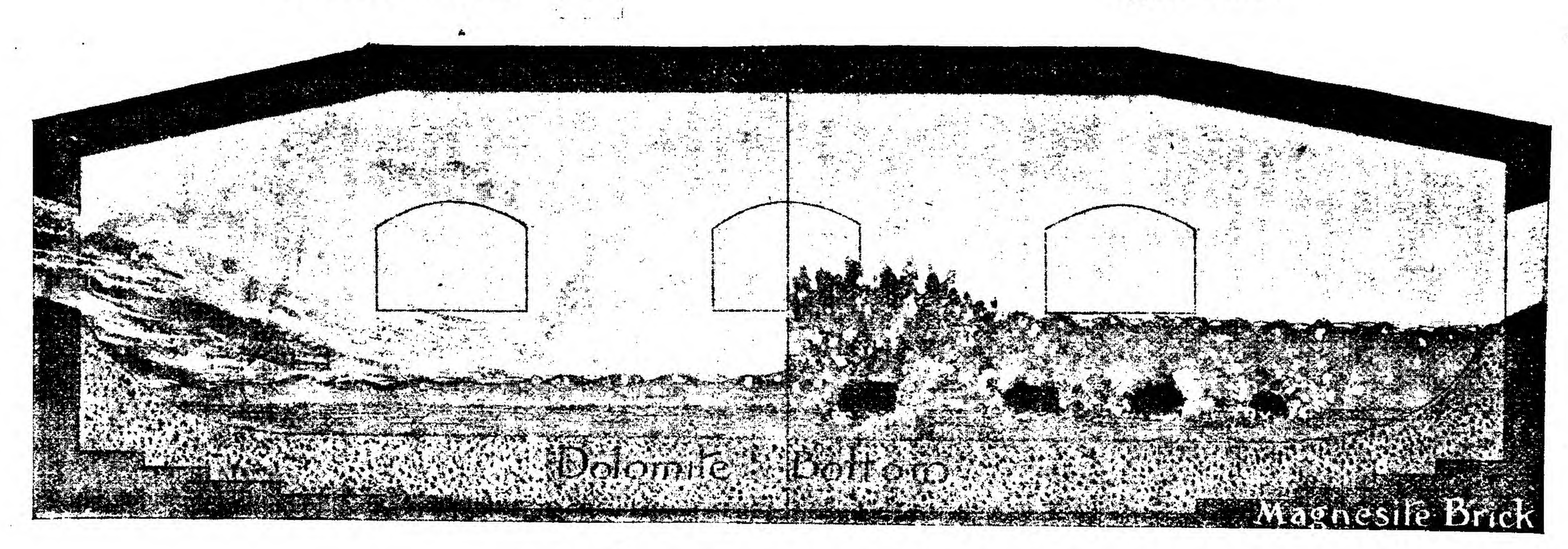


Рис. 97. Мартеновскій процессъ.

плавленнаго металла и соединяется съ известью, окисью желѣза и другими основаніями, заключающимися въ расплавленномъ шлакѣ. Однако, фосфорная кислота при этихъ условіяхъ настолько неустойчива, что по мѣрѣ образованія возстановляется углеродомъ и кремніемъ, содержащимися въ желѣзѣ, и даже самимъ желѣзомъ. По возстановленіи же она тотчасъ вновь соединяется съ желѣзомъ. Такимъ образомъ, въ конечномъ результатѣ не происходитъ удаленія фосфора. Для того чтобы достигнуть удаленія фосфора, необходимо придать шлаку способность сильно удерживать фосфорную кислоту. Это возможно въ томъ случаѣ, если шлакъ содержитъ большой избытокъ сильныхъ основаній, какъ известь и окись желѣза, ибо, будучи въ избыткѣ, они образуютъ съ фосфорной кислотой устойчивыя соли, которыя не поддаются возстановляющему дѣйствію расплавленнаго металла.

Кремнекислота играетъ въ данномъ случаѣ роль очень сильной кислоты. Поэтому, если содержаніе ея въ шлакѣ превышаетъ 20%, связь между основаніями и фосфорной кислотой настолько ослабляется, что послѣдняя возстановляется кремніемъ, углеродомъ или желѣзомъ въ фосфоръ, который и поглощается вновь расплавленнымъ металломъ.

Для того, чтобы удалить кремнекислоту, стѣнки печи, которыя при иныхъ условіяхъ обычно дѣлаются изъ песка или глины, въ данномъ случаѣ дѣлаются изъ нейтральнаго вещества, хромита ($FeOCr_2O_3$), или изъ основного и въ то же время неплавкаго вещества, какъ, напримѣръ, изъ магнезіи или смѣси магнезіи и извести, получающихся при обжиганіи доломита $(Ca, Mg) CO_3$. Обожженный доломитъ, смѣшанный приблизительно съ 10% обезвоженной каменноугольной смолы спекается подъ вліяніемъ высокой температуры печи въ твердую массу, которая оказывается болѣе стойкой, чѣмъ облицовка, въ составъ которой входитъ кремнекислота. Благадаря этому, «основной» процессъ въ настоящее время легче вести, чѣмъ прежній «кислый».

«Основной» мартеновскій процессъ пріобрѣлъ большое значеніе въ Германіи. Въ Соед. Штатахъ въ 1901 г. 77% всей мартеновской стали было получено при помощи основного процесса, въ Великобританіи же за первую половину 1902 г. только 13,6%.

Печи, обрабатывающія заразъ 50 тоннъ — въ пять разъ больше, чѣмъ въ 1880 г.—оказались настолько выгодными, что побудили къ постройкѣ двухъ печей, емкостью въ 70 тоннъ. Примѣненіе такихъ огромныхъ печей не вызвало никакихъ особыхъ затрудненій. Газъ и воздухъ поступаютъ въ печь, каждый въ отдѣльности, черезъ особое устье и даютъ настолько большое и длинное пламя, что оно заполняетъ собою все плавильное пространство.

Многія изъ этихъ печей снабжены особымъ приспособленіемъ, позволяющимъ наклонять (tilt) ихъ по окончаніи каждой плавки, какъ это указано стрѣлками на рис. 100. При этомъ расплавленная сталь выпускается въ разливочный ковшъ, расплавленный же шлакъ въ особый пріемникъ. Такимъ образомъ, сильно облегчается хлопотливая операція выпуска стали. Эти и другія преимущества печей системы «tilting» имѣютъ гораздо болѣе важное значеніе при основномъ процессѣ, чѣмъ при кисломъ; хотя даже и въ случаѣ основного процесса существуетъ мнѣніе, что печи системы «tilting» не настолько еще усовершенствованы, чтобы ихъ преимущества перевѣшивали большую стоимость устройства и починокъ.

279) Печь Сименса. — Рис. 98 — 101 предназначаются не только для поясненія печи системы «tilting», но и общаго принципа печи Сименса. Загруженный металлъ расплавляется и доводится до желаемаго состава и температуры въ рабочемъ пространствѣ печи, *G*, представляющемъ собой почти цилиндрическую камеру изъ кирпича, которая нагрѣвается при помощи сгоранія въ ней смѣси подогрѣтаго газа съ подогрѣтымъ воздухомъ. Это рабочее пространство и является собственно печью, въ которой протекаетъ весь мартеновскій процессъ, всѣ же остальныя приспособленія, кромѣ механизма для наклоненія рабочаго пространства, служатъ для того, чтобы подогрѣвать воздухъ и газъ, вводить ихъ въ печь и выводить продукты ихъ горѣнія въ трубу.

Какъ это происходитъ, легче себѣ представить, если разсматривать рис. 98 и 99 какъ одинъ общій чертежъ, а не какъ разрѣзы въ различныхъ плоскостяхъ. Сплошныя стрѣлки указываютъ на направленіе входящаго газа и воздуха, пунктирныя же стрѣлки—на направленіе уходящихъ продуктовъ горѣнія. Воздухъ и газъ (послѣдній изъ генератора или другого

источника, указаннаго въ лѣвой части рис. 99) поступаютъ черезъ H и J, при чемъ дальнѣйшій ихъ путь опредѣляется положеніемъ перекидныхъ клапановъ K и K'. Если эти клапаны занимаютъ положеніе, показанное сплошными линіями, то воздухъ и газъ направляются въ лѣвую пару «регенераторовъ»; воздухъ проходитъ черезъ крайній лѣвый регенераторъ, газъ черезъ регенераторъ, расположенный непосредственно справа отъ него.

Прежде чѣмъ заняться разсмотрѣніемъ дальнѣйшаго пути

Рис. 98. Разрѣзъ печи по EF.

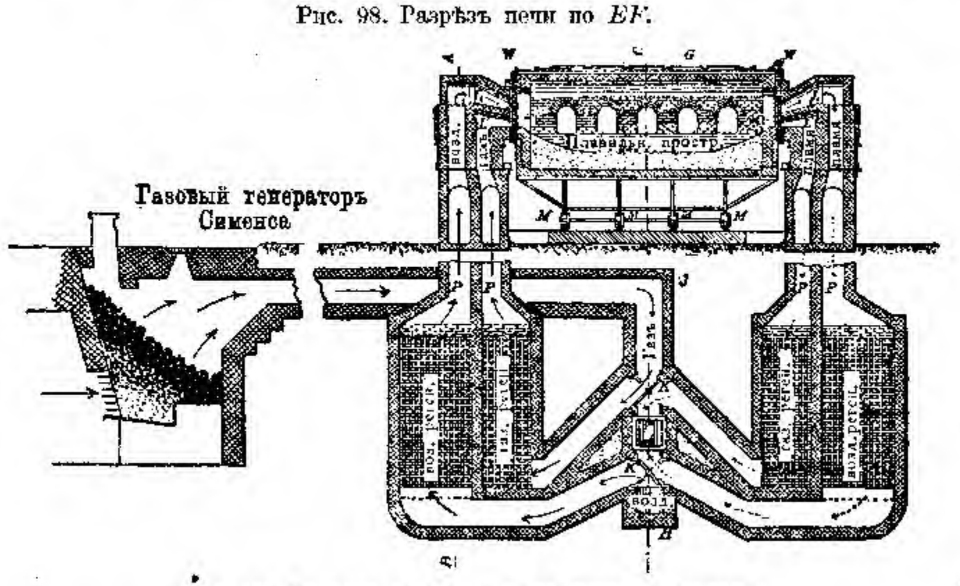


Рис. 99. Разрѣзъ черезъ регенераторы и клапаны.

газа и воздуха, отклонимся нѣсколько въ сторону и посмотримъ, какъ устроены эти регенераторы.

Регенераторы. Передъ смѣшиваніемъ газъ и воздухъ очень сильно подогрѣваютъ, пропуская ихъ въ отдѣльности черезъ регенераторы. Послѣдніе представляютъ собой прямоугольныя камеры, въ которыхъ сложены клѣтки изъ огнеупорнаго кирпича съ такимъ расчетомъ, чтобы среди нихъ могли проходить газъ или воздухъ. Благодаря этому газъ и воздухъ, въ отдѣльности, при прохожденіи черезъ регенераторъ приходятъ въ очень тѣсное соприкосновеніе съ заранѣе нагрѣтой поверхностью клѣтокъ. Какъ происходитъ это нагрѣваніе, будетъ вскорѣ указано. Теперь же пока намъ достаточно знать, что газъ и воздухъ

въ отдѣльности приходятъ въ соприкосновеніе съ огромной неровной поверхностью, образованной сильно нагрѣтыми огнеупорными кирпичами, и что при этомъ газъ очень сильно нагрѣвается, скажемъ, до 1.100°Ц. въ одномъ регенераторѣ, въ другомъ же одновременно идетъ очень сильное нагрѣваніе воздуха.

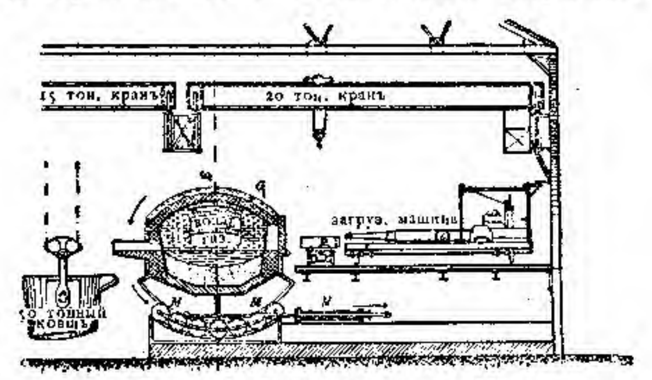


Рис. 100. Разрѣзъ печи по *CH*.

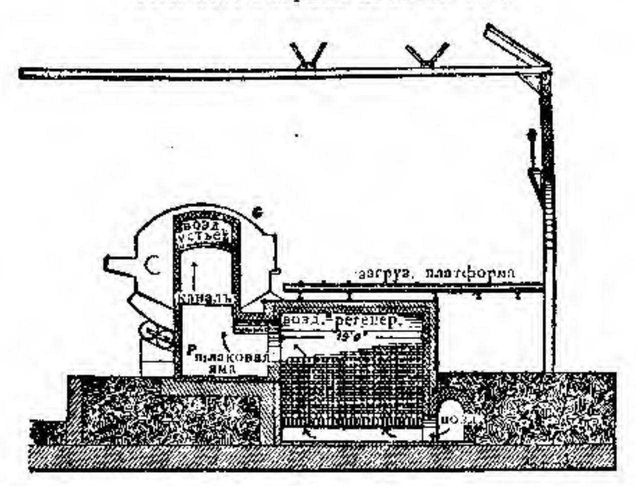


Рис. 101. Разрѣзъ по *AB* черезъ каналъ, шлаковую яму и регенераторъ.

Рис. 98 до 101. Схематическіе разрѣзы качающихся (tilting) печей и печей Siemens'a.

Обозначенія: *G*—тѣло печи; *H*—подача воздуха; *J*—подача газа; *K*—перекидной клапанъ для воздуха; *K'*—перекидной клапанъ для газа; *L*—устье для воздуха; *L'*—устье для газа; *M*—ролики, на которыхъ покоится печь; *N*—гидравлическіе цилиндры, при помощи которыхъ производится наклонъ печи; *O* — каналъ, ведущій къ дымоходу; *P* — шлаковыя ямы; *R*—загрузочныя коробки; *W*—охлаждаемыя водой соединенія между печью *G* и устьями *L* и *L'*.

Обратимся теперь вновь къ пути слѣдованія газа и воздуха, который мы уже прослѣдили до лѣвой пары регенераторовъ, служащихъ въ настоящей фазѣ для впуска газа и воздуха. Газъ и воздухъ, все еще въ видѣ двухъ отдѣльныхъ струй,

поднимаются по каналамъ (рис. 101) и затѣмъ уже смѣшиваются въ моментъ вступленія въ рабочее пространство черезъ устья L и L' (рис. 98). Будучи предварительно сильно нагрѣты, они, конечно, при горѣніи развиваютъ гораздо болѣе высокую температуру, чѣмъ та, которую они могли бы развить безъ предварительнаго нагрѣванія; образующееся при этомъ огромное пламя заполняетъ обширное рабочее пространство. Продукты горѣнія, подъ вліяніемъ тяги трубы, направляются въ правую часть рабочаго пространства, выходятъ черезъ правыя устья, какъ это указано пунктирными стрѣлками, и проходятъ внизъ черезъ правую пару регенераторовъ, при чемъ верхняя часть находящихся въ нихъ кирпичныхъ клѣтокъ нагрѣвается, скажемъ, до 1.300°Ц. Далѣе продукты горѣнія проходятъ черезъ клапаны K и K' и удаляются черезъ дымоходъ O.

Въ этой фазѣ вступающіе газъ и воздухъ отнимаютъ тепло отъ лѣвой пары регенераторовъ, которые, такимъ образомъ, охлаждаются, уходящіе же продукты горѣнія отдаютъ свое тепло правой парѣ регнераторовъ. Это продолжается приблизительно полъ-часа. Затѣмъ клапаны K и K' поворачиваютъ на 90° и придаютъ имъ положеніе, указанное пунктирными линіями. Благодаря этому воздухъ и газъ вступаютъ въ правую пару регенераторовъ и отнимаютъ при прохожденіи накопленное въ нихъ тепло. Отсюда они проходятъ черезъ правые каналы и устья въ рабочее пространство, гдѣ попрежнему смѣшиваются, сгораютъ и нагрѣваютъ шихту. Отсюда продукты горѣнія, подъ вліяніемъ тяги трубы, идутъ черезъ лѣвыя устья въ каналы и поступаютъ въ лѣвую пару регенераторовъ. Здѣсь они встрѣчаются вновь съ кирпичными клѣтками, нагрѣваютъ ихъ, и въ концѣ концовъ уходятъ черезъ дымоходъ O. Приблизительно черезъ полъ-часа направленіе газа и воздуха вновь мѣняютъ и т. д.

Въ этихъ регенераторахъ и заключается сущность печи Сименса или «регенеративной печи». Они представляютъ собой ловушки, захватывающія и аккумулирующія тепло продуктовъ горѣнія, съ тѣмъ, чтобы въ слѣдующей фазѣ отдать его газу и воздуху. Въ каждый данный моментъ одна пара регенераторовъ аккумулируетъ тепло, другая же пара его отдаетъ. Согласно проекту Сименса, вся печь дѣлалась неподвижной. Но H. H. Campbell и позднѣе S. T. Wellman внесли въ нее измѣненіе, сдѣлавъ часть

WW (рис. 98), содержащую рабочее пространство, подвижной, наклоняемой около своей оси. У печи системы H. H. Campbell, которая здѣсь представлена, наклоняемое рабочее пространство сообщается съ неподвижными каналами *L* и *L'* при помощи охлаждаемаго водой сочлененія *W*. Печь, покоющаяся на роликахъ *M*, приводится въ наклонное положеніе гидравлическимъ цилиндромъ *N* (рис. 100).

Для того чтобы пыль, которая выносится изъ плавильнаго пространства продуктами горѣнія, не засоряла регенераторовъ, шлаковые колодцы, *P* (рис. 101), снабжаются приспособленіемъ для ея улавливанія. Печь «tilting» системы Wellman'a при наклоненіи движется не на роликахъ, а по неподвижнымъ рейкамъ. Построено и находится въ работѣ около 37 такихъ печей Wellman'a, вмѣстимостью отъ 3 до 70 тоннъ. Ихъ суточная производительность составляетъ, такимъ образомъ, отъ 15 до 100 тоннъ. Въ числѣ ихъ двѣ печи по 70 тоннъ предназначены для процесса Talbot'a. Было предложено построить печь Wellman'a для этого процесса вмѣстимостью въ 200 тоннъ, но преимущества печи такого огромнаго размѣра представляютъ собою вопросъ не рѣшенный.

Загрузка по системѣ Wellman'a производится слѣдующимъ образомъ. Металлъ нагружается рабочими въ желѣзные коробки *K* (рис. 100), установленные на вагонеткахъ. Паровозъ подводитъ поѣздъ, составленный изъ такихъ вагонетокъ, на путь, идущій вдоль цѣлаго ряда мартеновскихъ печей. Здѣсь загрузочная машина поднимаетъ одинъ коробокъ за другимъ съ вагонетокъ и вталкиваетъ ихъ въ открываемыя для этого окна печей; при этомъ коробокъ опрокидывается, содержимое его высыпается на подъ печи, и затѣмъ онъ вновь устанавливается на вагонетку.

280) Новыя видоизмѣненія мартеновскаго процесса.—Какъ уже было въ краткихъ чертахъ указано въ § 267, чугунъ отличается отъ стали главнымъ образомъ тѣмъ, что онъ содержитъ больше углерода и кремнія и часто больше фосфора. При мартеновскомъ процессѣ расплавленный чугунъ превращаютъ въ сталь или 1) уменьшая въ немъ концентрацію углерода и кремнія путемъ прибавленія стальныхъ обрѣзковъ или сварочнаго желѣза, или 2) окисляя углеродъ и кремній при помощи окислительнаго пламени сименсовской печи и окиси желѣза, приса-

живаемой въ видѣ руды или окалины, или 3) тѣмъ и другимъ способомъ одновременно. Первый изъ указанныхъ способовъ долженъ былъ бы быть самымъ дешевымъ, такъ какъ обычно стоимость руды гораздо меньше стоимости желѣзнаго лома, если бы не приходилось при этомъ вести процессъ чрезвычайно медленно; ибо въ противномъ случаѣ расплавленная масса, пѣнящаяся подъ вліяніемъ выдѣляющейся окиси углерода, которая образуется при окисленіи углерода металла, можетъ перелиться черезъ край. При бессемерованіи, которое продолжается столько же минутъ, сколько часовъ длится мартеновскій процессъ быстрое обезуглероживаніе, сопровождающееся бурнымъ вскипаніемъ, допустимо потому, что бессемеровскій конвертеръ настолько глубокъ, что не приходится опасаться переливанія металла черезъ край. Кромѣ того, руду приходится присаживать небольшими порціями, чтобы не охладить расплавленнаго металла какъ непосредственно, такъ и вслѣдствіе того, что реакція между окисью желѣза и углеродомъ поглащаетъ тепло. Такое мѣстное охлажденіе заставляетъ массу сильнѣе пѣниться. Дѣло въ томъ, что кусокъ руды охлаждаетъ непосредственно окружающій его шлакъ какъ разъ въ томъ мѣстѣ, гдѣ кислородъ руды реагируетъ съ углеродомъ металла, образуя окись углерода. Шлакъ становится вязкимъ и пріобрѣтаетъ способность легко пѣниться какъ разъ въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ для этого существуютъ наиболѣе благопріятныя условія,—въ мѣстахъ наибольшаго выдѣленія окиси углерода.

Въ дальнѣйшемъ мы вкратцѣ разсмотримъ три новыхъ видоизмѣненія мартеновскаго процесса, а именно процессы Bertrand-Thiel'я, Talbot'a и Monnell'я.

281) Процессъ Bertrand-Thiel'я.—Окисленіе углерода по способу Bertrand'a и Thiel'я достигается тѣмъ, что расплавленный чугунъ наливается на подъ мартеновской печи, на которомъ находятся накаленные стальные обрѣзки. Поверхность послѣднихъ, подъ вліяніемъ нагрѣванія, сильно окислена. Придя въ соприкосновеніе съ расплавленнымъ чугуномъ, стальные обрѣзки плавятся и сливаются съ нимъ, вслѣдствіе чего создаются очень благопріятныя условія для реакціи между кислородомъ обрѣзковъ и углеродомъ чугуна. Эта реакція идетъ чрезвычайно быстро, такъ какъ она происходитъ во всей массѣ металла, тогда какъ при обычныхъ способахъ окисленіе идетъ только на

поверхности чугуна, находящейся въ соприкосновеніи съ шлакомъ. Кромѣ того, несмотря на быстрое окисленіе, масса не особенно пѣнится, потому что здѣсь не происходитъ мѣстнаго охлажденія, вызывающаго вязкость и стремленіе къ образованію пѣны.

282) Процессъ Talbot'а.—Мартеновскій процессъ, какъ и всѣ другіе процессы, идущіе при высокой температурѣ, гораздо экономнѣе вести въ широкомъ масштабѣ (см. ниже). Однако, мартеновская печь очень большой вмѣстимости, положимъ въ 75 или 100 тоннъ, имѣетъ тотъ недостатокъ, что сталь получается въ очень большихъ количествахъ и черезъ сраннительно длинные промежутки времени; благодаря этому, послѣдующія операціи, нагрѣваніе и прокатка, сопряжены съ бо́льшими затрудненіями, чѣмъ при полученіи стали въ небольшихъ количествахъ и черезъ короткіе промежутки времени. B. Talbot обходитъ эти затрудненія, ведя процессъ какъ бы непрерывно. Въ печь загружается 70 тоннъ чугуна, и обработна его идетъ такимъ образомъ, что черезъ сравнительно короткіе промежутки получающаяся сталь извлекается изъ печи порціями по 20 тоннъ, на мѣсто же каждыхъ извлеченныхъ 20 тоннъ стали загружаются новые 20 тоннъ чугуна. Помимо нѣкоторыхъ менѣе важныхъ преимуществъ, этотъ способъ выгоденъ еще въ томъ отношеніи, что позволяетъ избѣгать остановки въ ходѣ процесса, неизбѣжно наступающей непосредственно по расплавленіи чугуна при обычномъ его веденіи. Дѣло въ томъ, что къ концу плавленія чугуна шлакъ становится временно очень богатъ окисью желѣза и кремнекислотой, происходящими отъ окисленія чугуна и содержащагося въ немъ кремнія, которое совершается во время медленнаго плавленія насадки. Такой шлакъ не только разъѣдаетъ футеровку печи, но и мѣшаетъ удаленію фосфора, такъ какъ онъ неспособенъ удерживать послѣдняго. Кромѣ того, сравнительно низкая температура задерживаетъ обезуглероживаніе. Очевидно, что такая остановка невозможна при непрерывномъ ходѣ процесса.

283) Процессъ Monell'я.—При сравнительно низкой температурѣ, около 1.300° Ц., фосфоръ окисляется и удаляется изъ чугуна гораздо скорѣе, чѣмъ углеродъ, при болѣе же высокой температурѣ, около 1.500° Ц., углеродъ окисляется легче фосфора.

Очень выгодно удалить фосфоръ въ ранней стадіи процесса, для того чтобы къ тому времени, когда содержаніе углерода въ

стали упадетъ до желаемаго предѣла, она уже не заключала въ себѣ фосфора и была готова для отливанія. Хотя въ ранней стадіи мартеновскаго процесса, т. е. до окончанія плавленія насадки, температура и низка, но удаленію фосфора препятствуетъ то, что временно шлакъ становится киселъ, какъ это только что выше было указано. На заводѣ Carnegie достигаютъ благопріятныхъ условій для удаленія фосфора—низкой температуры и основного шлака, примѣняя способъ Monell'я. Онъ состоитъ въ томъ, что расплавленный, но находящійся при сравнительно невысокой температурѣ чугунъ вливаютъ въ мартеновскую печь на слой изъ нагрѣтой извести и окиси желѣза.

Вслѣдствіе такихъ благопріятныхъ условій переходъ фосфора изъ металла въ шлакъ происходитъ чрезвычайно быстро. Въ то же время, кипѣніе, вызываемое выдѣленіемъ окиси углерода, идетъ настолько бурно, что большая часть фосфористаго шлака выливается изъ печи; такимъ образомъ, фосфоръ совершенно удаляется, и исчезаетъ опасность, что онъ опять возстановится и перейдетъ въ сталь, а кромѣ того, металлъ частью освобождается отъ задерживающаго доступъ тепла слоя шлака. Однако нельзя сказать, чтобы масса при этомъ слишкомъ уже сильно пѣнилась, потому что шлакъ не испытываетъ мѣстнаго охлажденія со стороны кусковъ руды и не дѣлается вязкимъ, какъ при обычныхъ способахъ веденія процесса.

284) Бессемеровскій процессъ.—Прогрессъ въ бессемеровскомъ процессѣ выразился главнымъ образомъ въ примѣненіи: 1) расплавленнаго чугуна непосредственно изъ доменной печи; 2) «миксеровъ» (mixers), въ которыхъ смѣшивается чугунъ изъ нѣсколькихъ доменныхъ печей, въ цѣляхъ достиженія большей однородности въ составѣ; 3) изложницъ на вагонеткахъ, въ которыя отливается расплавленная сталь. Кромѣ этихъ успѣховъ, касающихся не сущности самаго процесса, а способа его веденія, надо еще указать на 4) широкое примѣненіе, которое нашелъ основной бессемеровскій процессъ, иначе называемый томасовскій процессъ.

285) Примѣненіе чугуна для бессемерованія непосредственно изъ доменной печи. Миксеръ.—До недавняго времени чугунъ для бессемерованія отливался въ свинки, которыя затѣмъ разбивали на куски въ-ручную и расплавляли, что вызывало большіе расходы. Уже давно пришли къ тому убѣжде-

нію, что составило бы большую экономію, если бы можно было избѣжать такого расплавленія, т. е. если бы можно было бессемеровать расплавленный чугунъ непосредственно по выпускѣ изъ доменной печи. Затрудненіе заключалось въ томъ, что, вслѣдствіе неизбѣжной неравномѣрности въ ходѣ доменнаго процесса, содержаніе сѣры и кремнія въ чугунѣ испытываетъ рѣзкія колебанія, недопустимыя при бессемерованіи. Сѣра, которая не поддается удаленію при кисломъ бессемеровскомъ процессѣ, настолько вредитъ качествамъ стали, что ея содержаніе всегда должно быть обусловлено извѣстнымъ предѣломъ, въ зависимости отъ того, для какой цѣли сталь изготовляется. Кромѣ того, точка, на которой процессъ долженъ быть остановленъ, узнается по виду пламени, вырывающагося изъ конвертера; измѣненія же въ содержаніи кремнія въ чугунѣ настолько мѣняютъ видъ пламени, что теряется контроль надъ процесосмъ. Слѣдуетъ еще замѣтить, что качество получающейся стали находится въ близкой зависимости отъ температуры, при которой идетъ процессъ, послѣдняя же въ свою очередь зависитъ отъ содержанія кремнія, горѣніе котораго и является главнымъ источникомъ развивающагося тепла. Отсюда ясно, какъ важно, чтобы содержаніе кремнія въ чугунѣ было постояннымъ. Это было достигнуто на принадлежащемъ Carnegie заводѣ «Edgar Thomson» примѣненіемъ изобрѣтеннаго капитаномъ W. R. Jones «миксера» (mixer). Миксеръ представляетъ собою большой резервуаръ, въ который поступаетъ расплавленный чугунъ изъ всѣхъ доменныхъ печей. Емкость его около двухсотъ или болѣе тоннъ. Чугунъ поддерживается въ расплавленномъ состояніи при помощи очень незначительнаго подогрѣванія. Смѣшанный такимъ образомъ чугунъ извлекается по частямъ и поступаетъ для перерабстки на сталь по бессемеровскому способу.

Такой пріемъ не только способствуетъ гораздо большей равномѣрности чугуна, но служитъ также и для удаленія значительной части сѣры. Это объясняется тѣмъ, что при нахожденіи чугуна въ миксерѣ идетъ очень интересная медленная реакція. Многіе металлы обладаютъ способностью растворять собственныя окиси и сѣрнистыя соединенія, но не растворяютъ окисей и сѣрнистыхъ соединеній другихъ металловъ. Такъ, сѣрнистое желѣзо легко растворимо въ желѣзѣ, сѣрнистый же кальцій и марганецъ въ немъ нерастворимы. Кальцій, возстановляясь въ

доменной печи, жадно соединяется съ сѣрой, растворенной въ желѣзѣ въ видѣ сѣрнистаго желѣза; образовавшійся же сѣрнистый кальцій выдѣляется изъ желѣза и соединяется съ шлакомъ.

Точно также, если расплавленный чугунъ, находящійся въ миксерѣ, содержитъ марганецъ, послѣдній соединяется съ сѣрой и образуетъ почти нерастворимый въ желѣзѣ сѣрнистый марганецъ, всплывающій на поверхность. Придя въ соприкосновеніе съ воздухомъ, сѣрнистый марганецъ окисляется, при чемъ образуется сѣрнистый газъ, который и выдѣляется. Миксеры вошли теперь въ общее употребленіе, а благодаря имъ привилось и примѣненіе расплавленнаго чугуна непосредственно для бессемерованія.

Конечно, извѣстная неравномѣрность въ содержаніи кремнія неизбѣжна, а, слѣдовательно, должны быть и колебанія въ температурѣ, развивающейся при бессемерованіи. Съ этимъ борются, внося въ конвертеръ извѣстное количество стальныхъ обрѣзковъ (концевые обрѣзки рельсовъ и т. п.) во время самаго процесса, а также, въ Соединенныхъ Штатахъ, примѣшивая къ продуваемому черезъ расплавленный чугунъ воздуху извѣстное количество водяного пара. Паръ даетъ возможность очень удобно регулировать температуру, такъ какъ, разлагаясь, онъ поглощаетъ много тепла, а, слѣдовательно, понижаетъ температуру. Если температура грозитъ упасть слишкомъ низко, ее можно поднять, наклонивъ конвертеръ такимъ образомъ, чтобы дутье изъ части каналовъ шло черезъ тонкій слой металла; при этомъ значительная часть желѣза будетъ окисляться и послужитъ источникомъ тепла, правда, дорогимъ.

286) Система отливки въ изложницы, помѣщающіяся на вагонеткахъ, заслуживаетъ описанія главнымъ образомъ потому, что она можетъ служить хорошимъ примѣромъ, какое большое промышленное значеніе можетъ имѣть даже незначительное упрощеніе операцій и небольшая экономія тепла въ тѣхъ случаяхъ, когда работа ведется въ такомъ огромномъ масштабѣ, какъ при бессемерованіи.

Сталь, независимо отъ того окончательнаго вида, который будетъ приданъ ей при прокаткѣ, выпускается изъ бессемеровскаго конвертера въ большой, обдѣланный огнеупорной массой ковшъ, а затѣмъ изъ него отливается въ вертикальныя коническія изложницы (рис. 103). Далѣе болванки поступаютъ въ

подогрѣвательную печь, гдѣ онѣ доводятся до требуемой для прокатки температуры (§ 297).

По отливкѣ, болванки необходимо помѣщать въ печь какъ можно скорѣе, во-первыхъ, для того, чтобы по возможности

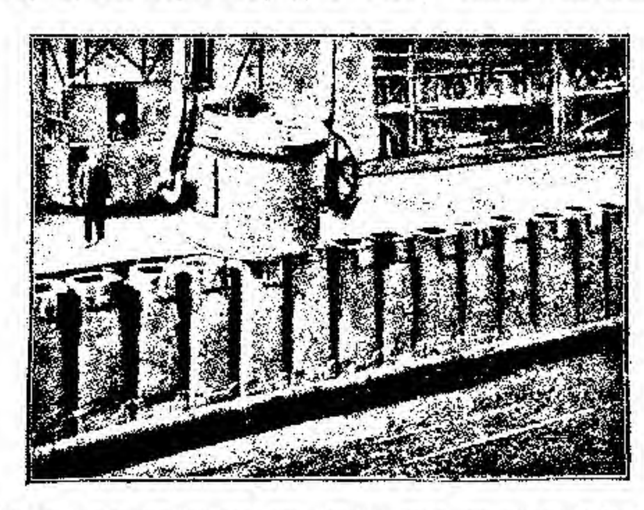


Рис. 102. Отливка въ изложницы на вагонеткахъ по системѣ F. W. Wood'a.

уменьшить потерю тепла, во-вторыхъ, для того, чтобы не задержать отливки слѣдующихъ болванокъ, что очень важно, такъ какъ одна плавка за другой слѣдуетъ чрезвычайно быстро. Два конвертера переработали, при 4.958 плавкахъ, по десяти тоннъ, въ общемъ 50.547 тоннъ за мѣсяцъ, или въ среднемъ, принимая въ расчетъ рабочій день, одна плавка продолжалась 7 минутъ 24 секунды. Такой удивительной скоростью и объясняется выгодность этого процесса, а съ другой стороны она опредѣляетъ всѣ детали его веденія. Въ силу того, что изложница защищаетъ отъ потери тепла, болванку слѣдуетъ извлекать изъ нея только непосредственно передъ самымъ помѣщеніемъ ея въ печь. Указанныя усло-

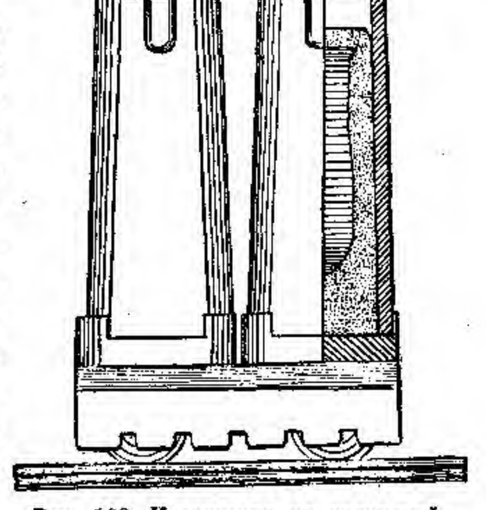


Рис. 103. Изложница на вагонеткѣ. Внутри изложницы видна коническая болванка.

вія достигаются примѣненіемъ системы отливки въ изложницы, помѣщающіяся на вагонеткахъ, F. W. Wood'а (рис. 102 и 103). По отливкѣ стали вагонетки эти тотчасъ подводятъ къ подогрѣвательной печи.

Очевидно, затвердѣваніе болванки въ изложницѣ должно идти снаружи внутрь. По мѣрѣ охлажденія, образуется все болѣе толстая и крѣпкая корка (рис. 103). Когда она достигнетъ достаточной прочности, чтобы выдержать сжатіе щипцовъ, при помощи которыхъ болванка переносится въ печь, коническія изложницы снимаются съ болванокъ и помѣщаются на рядомъ стоящій поѣздъ вагонетокъ. Болванки тотчасъ помѣщаются въ печь. Поѣздъ съ пустыми изложницами отводится въ сторону и, какъ только онѣ достаточно охладятся, ихъ вновь подводятъ къ конвертеру для новой отливки.

При этой системѣ каждая болванка и каждая изложница перемѣщаются какъ отдѣльная единица только одинъ разъ,—изложница при переноскѣ ея съ одного поѣзда на другой, болванка при помѣщеніи ея въ печь. При другихъ перемѣщеніяхъ всѣ изложницы и болванки, по отливкѣ даннаго количества стали, образуютъ одинъ поѣздъ, передвигаемый паровозомъ. Преимущества отливки въ изложницы на вагонеткахъ стали очевидными вскорѣ послѣ введенія процесса Бессемера, и былъ предложенъ цѣлый рядъ проектовъ для практическаго ея осуществленія. Однако при этомъ встрѣтилось очень серьезное затрудненіе. Дѣло въ томъ, что иногда при выливаніи стали изъ ковша въ изложницу извѣстное количество ея можетъ пролиться мимо и попасть на рельсы или ходъ вагонетокъ. Изъ-за етого можетъ произойти задержка поѣзда, такъ какъ сталь при затвердѣваніи пристаетъ очень прочно. Подобныя же задержки совершенно недопустимы, потому что главная выгода этого процесса и обусловливается чрезвычайно быстрымъ веденіемъ всѣхъ связанныхъ съ нимъ операцій. Это-то затрудненіе и препятствовало отливкѣ въ изложницы на вагонеткахъ. До изобрѣтенія Wood'омъ системы отливки въ изложницы на вагонеткахъ описанныя операціи были сопряжены съ гораздо большими расходами. При отливкѣ стали изложницы помѣщались не на вагонеткахъ, а стояли прямо на полу отливочнаго колодца.

Болванки охлаждались до тѣхъ поръ, пока не образовывалась достаточно прочная корка, затѣмъ ихъ вынимали изъ излож-

цинъ. Послѣднія ставились на полъ для охлажденія, болванки же помѣщались на вагонетки и доставлялись къ подогрѣвательной печи. Вслѣдъ за этимъ изложницы вновь помѣщались въ отливочный колодезь. При такомъ веденіи операціи каждая болванка и каждая изложница перемѣщались, какъ отдѣльная единица, дважды, вмѣсто одного раза, какъ при отливкѣ въ изложницы на вагонеткахъ. Ничѣмъ не защищенныя болванки теряли лучеиспусканіемъ большое количество тепла при перевозкѣ изъ помѣщенія, гдѣ ведется бессемерованіе, къ печамъ. Тепло же, излучаемое изложницами, не только терялось даромъ, но и нагрѣвало помѣщеніе до такой степени, несмотря на открытыя двери, что это обстоятельство значительно удорожало работу.

Wood'у очень просто удалось избѣжать проливанія стали на рельсы и ходъ вагонетокъ. Онъ сконструировалъ вагонетки такимъ образомъ, что они совершенно прикрываютъ какъ рельсы, такъ и собственный ходъ отъ попаданія на нихъ стали (рис. 103). Это простое приспособленіе существенно понизило стоимость стали и увеличило ея производство.

287) Увеличеніе производительности пары бессемеровскихъ конвертеровъ. —Таблица 15. Максимальная недѣльная производительность пары американскихъ конвертеровъ въ тоннахъ

Годъ	Тонны
1870	254
1880	3.433
1889	8.549
1899, за мѣсяцъ средняя недѣльная производительность была	11.233
1902	13.703
1903	15.704 [1]

Такимъ образомъ, за тридцать три года производительность пары конвертеровъ повысилась больше, чѣмъ въ шестьдесятъ разъ.

Производительность европейскихъ заводовъ, ведущихъ бессемерованіе, гораздо меньше американскихъ. Такъ, въ Германіи за 1899 г. по кислому бессемеровскому способу въ цѣломъ было получемо стали немногимъ болѣе, чѣмъ при помощи

[1] Міровой рекордъ для двухъ десяти-тонныхъ конвертеровъ.

одной пары американскихъ конвертеровъ за тотъ же годъ. При помощи же трехъ паръ американскихъ конвертеровъ той же производительности можно было бы получить столько же стали, сколько было получено кислымъ и основнымъ способомъ при помощи всѣхъ дѣйствующихъ 65-ти бессемеровскихъ конвертеровъ въ Великобританіи за 1899 г.

288) **Величина конвертеровъ.** — Бессемеровскій процессъ, какъ и большинство процессовъ, идущихъ при высокой температурѣ, выгоднѣе вести въ большомъ масштабѣ. То же самое справедливо по отношенію и къ другимъ производствамъ. Но здѣсь выгода обусловливается еще тѣмъ обстоятельствомъ, что большая, нагрѣтая до высокой температуры печь, или вообще тѣло, теряетъ вслѣдствіе лучеиспусканія относительно меньше тепла, чѣмъ небольшое тѣло, совершенно подобно тому, какъ тонкая раскаленная проволока охлаждается на воздухѣ гораздо скорѣе, чѣмъ раскаленный до одинаковой съ ней температуры толстый брусокъ. Этимъ и объясняется непрерывный ростъ въ величинѣ конвертеровъ. Въ настоящее время существуютъ конвертеры для насадокъ до 20 тоннъ. Съ другой стороны, съ успѣхомъ можно вести бессемерованіе и гораздо меньшихъ насадокъ, меньше половины тонны, въ тѣхъ случаяхъ, когда требуется приготовить какой-либо особенный сортъ стали.

Бессемеровскій процессъ имѣетъ очень большое значеніе для изготовленія стальныхъ отливокъ, т. е. предметовъ болѣе или менѣе сложной формы, которые непосредственно отливаются, а не выдѣлываются при помощи проковки или прокатки изъ стальныхъ болванокъ. При изготовленіи отливокъ, въ особенности очень тонкихъ и сложныхъ, сталь необходимо нагрѣть гораздо выше точки плавленія, для того, чтобы, оставаясь достаточно долгое время въ расплавленномъ состояніи, она могла заполнить всѣ узкія части формы. Въ этомъ отношеніи бессемеровскій процессъ обладаетъ большими преимуществами предъ тигельнымъ и мартеновскимъ, такъ какъ онъ даетъ возможность достигнуть гораздо болѣе высокой температуры, чѣмъ послѣдніе. До сихъ поръ еще не достигнутъ предѣлъ, до котораго можно поднять температуру при бессемеровскомъ процессѣ, особенно если вести его такимъ образомъ, чтобы шло окисленіе не только кремнія и углерода, но и части желѣза; по способу Walrand—Legenisel, послѣ того какъ температура поднимется очень

высоко подъ вліяніемъ окисленія кремнія и углерода, первоначально заключающихся въ чугунѣ, присаживаютъ еще кремнія въ видѣ ферро-кремнія и, продолжая продувку, окисленіемъ его, достигаютъ дальнѣйшаго повышенія температуры.

При тигельномъ и мартеновскомъ процессахъ повышеніе температуры допустимо только до извѣстнаго предѣла, такъ какъ существуетъ опасность расплавить самую печь, какъ потому, что нѣкоторыя существенныя ея части расположены очень неблагопріятно въ томъ отношеніи, что онѣ нагрѣваются со всѣхъ сторонъ, такъ и потому, что печь по необходимости нагрѣвается выше изготовляемой въ ней стали. У бессемеровскаго же конвертера ни одна изъ частей не можетъ легко пострадать отъ дѣйствія высокой температуры и ни одна изъ нихъ не нагрѣвается болѣе чѣмъ съ одной стороны; кромѣ того, температура конвертера необходимо ниже температуры содержащагося въ немъ металла, такъ какъ тепло развивается въ самомъ металлѣ подъ вліяніемъ сгоранія кремнія и другихъ элементовъ. При бессемеровскомъ процессѣ сталь нагрѣваетъ конвертеръ, тогда какъ при мартеновскомъ и тигельномъ процессахъ, наоборотъ, печь нагрѣваетъ сталь.

289) Основной бессемеровскій процессъ.—Примѣненіе этого процесса ограничивается 1) тѣмъ, что онъ дороже нормальнаго кислаго бессемеровскаго процесса, особенно по сколько это касается до починокъ конвертера; 2) тѣмъ, что въ настоящее время онъ примѣнимъ только къ чугуну, содержащему, по меньшей мѣрѣ, 1,80% фосфора; 3) тѣмъ, что сравнительно мало рудъ, изъ которыхъ можно получать такой чугунъ. Короче говоря, этотъ процессъ примѣнимъ только тамъ, гдѣ имѣется подъ рукой дешевый, съ указаннымъ выше содержаніемъ фосфора, чугунъ. Кромѣ того лучше, но не необходимо, чтобы чугунъ содержалъ еще по меньшей мѣрѣ 1,80% марганца и чтобы въ немъ было не болѣе 1% кремнія и 0,12% сѣры.

Изъ руды съ достаточнымъ содержаніемъ фосфора, главной является бѣдная, но очень дешевая руда «Minette», образующая огромныя залежи въ Люксембургѣ и Лотарингіи. Въ Швеціи также есть залежи подобной руды, которымъ предстоитъ, вѣроятно, большая будущность.

Въ 1899 г. въ Германіи и Люксембургѣ 86% бессемеровской стали были приготовлены по основному способу, въ Великобри-

таніи 28%. Основной способъ имѣетъ значеніе также въ Бельгіи и Богеміи. Въ Соед. Штатахъ очень мало фосфористыхъ рудъ, которыя были бы настолько дешевле не содержащихъ фосфора или «бессемеровскихъ» рудъ, чтобы дать возможность основному процессу конкурировать съ кислымъ бессемеровскимъ процессомъ. Основной процессъ нѣкоторое время примѣнялся на двухъ американскихъ заводахъ, на другихъ дѣлались опыты его примѣненія, но теперь въ Соед. Штатахъ онъ совершенно оставленъ, и едва ли возродится въ близкомъ будущемъ.

Роль фосфора, содержаніе котораго въ чугунѣ должно составлять 1,80%, состоитъ въ томъ, чтобы, окисляясь въ фосфорную кислоту при продуваніи воздуха черезъ металлъ, развивать очень высокую температуру, около 1600° Ц.; при этомъ сталь нагрѣвается выше точки плавленія и остается достаточно долгое время въ расплавленномъ состояніи, для того, чтобы ее можно было отлить въ изложницы.

Въ данномъ случаѣ кремній не можетъ служить главнымъ источникомъ тепла, какъ въ кисломъ бессемеровскомъ процессѣ, потому что образующаяся кремнекислота разрушала бы основную футеровку конвертера и вызывала бы «рефосфоризацію» (см. § 278). Конечно, послѣдней можно было бы избѣгнуть прибавленіемъ большого количества извести, но известь, во-первыхъ, занимала бы очень много цѣннаго мѣста въ конвертерѣ, а во-вторыхъ поглощала бы значительную часть тепла, развивающагося при окисленіи кремнія. Кромѣ того, если содержаніе кремнія гораздо больше 1%, металлъ настолько сильно пѣнится, что выбрасывается въ значительномъ количествѣ изъ горла даже очень объемистыхъ конвертеровъ.

Присутствіе марганца въ количествѣ 1,80% желательно для предотвращенія красноломкости получающейся стали, т. е. хрупкости ея при красномъ каленіи.

Содержаніе сѣры въ чугунѣ должно быть возможно меньше потому, что удаленіе ея въ сколько нибудь значительномъ количествѣ при бессемерованіи сопряжено съ большими трудностями и расходами; въ получающейся же стали допустимо очень небольшое содержаніе сѣры, такъ какъ она оказываетъ чрезвычайно вредное вліяніе на ея свойства.

Основная футеровка, дѣлаемая изъ обожженаго доломита, смѣшаннаго съ 10% обезвоженной каменно-угольной смолы, до-

рога и выноситъ переработку сравнительно небольшого числа насадокъ—на немногихъ заводахъ болѣе 200, на другихъ только 100—тогда какъ кремнекислая футеровка, при кисломъ процессѣ, выноситъ переработку тысячъ насадокъ. Поэтому, при основномъ процессѣ надо имѣть лишніе конвертеры, чтобы часть ихъ могла находиться въ работѣ, часть въ ремонтѣ. Новая футеровка дѣлается или на мѣстѣ или, по системѣ Holley, конвертеры для этого переводятся въ особое зданіе.

Шлакъ, получающійся при основномъ процессѣ и обычно содержащій около 18% фосфорной кислоты, представляетъ собой важный побочный продуктъ, такъ какъ служитъ хорошимъ искусственнымъ удобреніемъ. Процентный составъ его приблизительно слѣдующій:

Фосфорная кислота.	Кремнекислота.	Окись кальція.	Окись магнія.	Закись желѣза.
отъ 16 до 19	отъ 6 до 9	50	3	13

Сливъ шлакъ съ расплавленной стали, къ нему прибавляютъ, пока онъ еще находится въ расплавленномъ состояніи, немного песка, богатаго кремнекислотой, для того, чтобы выдѣленіе фосфорной кислоты шло болѣе полно подъ вліяніемъ гуминовыхъ кислотъ почвы. Затѣмъ шлакъ перемалывается въ очень мелкій порошокъ и въ такомъ видѣ примѣняется для удобренія.

290) Науглероживаніе по способу Darby.—При основномъ бессемеровскомъ процессѣ нельзя достигнуть удаленія большей части фосфора раньше, чѣмъ будетъ удаленъ углеродъ. Повидимому, это объясняется тѣмъ, что известь, которая загружается въ кускахъ, очень медленно сливается съ шлакомъ, и послѣдній, т. е. расплавленная, дѣятельная часть его, пріобрѣтаетъ только къ концу операціи достаточно основныя свойства, чтобы пріобрѣсти способность удерживать фосфорную кислоту. Поэтому, при изготовленіи высокоуглеродистой стали, не представляется возможнымъ, какъ при кисломъ бессемеровскомъ процессѣ, остановить операцію, какъ только содержаніе углерода упадетъ до желаемаго предѣла. Необходимо удалить почти весь углеродъ, затѣмъ фосфоръ и затѣмъ произвести «науглероживаніе», т. е. прибавить столько углерода, сколько его должно содержаться

въ стали. Вслѣдствіе нѣкоторыхъ отрицательныхъ сторонъ, которыя присущи прибавленію углерода въ видѣ чугуна, Darby прибѣгаетъ къ прибавленію его въ видѣ ретортнаго угля, кокса и тому подобныхъ углеродистыхъ веществъ, жадно поглощаемыхъ расплавленной сталью.

Способъ Darby, въ опытныхъ рукахъ дающій хорошіе результаты, широко примѣняется въ связи съ основнымъ бессемеровскимъ процессомъ, хотя, конечно, ничто не препятствуетъ его примѣненію также и при кисломъ бессемеровскомъ и мартеновскомъ процессахъ.

291) Сравненіе процессовъ.—Пудлинговый процессъ, которому часто предшествуетъ удаленіе кремнія при помощи «рафинированія», по настоящее время еще широко примѣняется для выдѣлки сварочнаго желѣза. Послѣднее примѣняется въ тѣхъ случаяхъ, когда отъ матеріала требуется, чтобы онъ очень легко сваривался, или чтобы онъ обладалъ чрезвычайной тягучестью, которой съ увѣренностью нельзя ожидать отъ стали. Кромѣ того, сварочное желѣзо многими примѣняется для разнообразныхъ цѣлей, частью по незнанію, частью по крайнему консерватизму. Сварочное желѣзо служитъ также матеріаломъ при тигельномъ процессѣ.

Для выдѣлки лучшихъ сортовъ инструментальной стали служитъ тигельный процессъ. За тигельную же сталь выдаются, хотя часто и ложно, тѣ сорта стали, которымъ приписываются очень высокія качества.

Но большая часть стали изготовляется при помощи бессемеровскаго и мартеновскаго процессовъ. Обыкновенно принимаютъ, что мартеновская сталь лучше бессемеровской, а также что кислый способъ въ обоихъ случаяхъ даетъ лучшіе результаты, чѣмъ основной. Вѣроятно, это не совсѣмъ такъ, но, безусловно, кислый способъ способенъ давать лучшій продуктъ, чѣмъ основной. Изъ очень многихъ рудъ нельзя получить чугуна, который содержалъ бы настолько мало фосфора, чтобы его можно было дальше перерабатывать по кислому бессемеровскому или кислому мартеновскому способу. Съ другой стороны, изъ нихъ нельзя получить и чугуна, который содержалъ бы достаточно фосфора для основного бессемеровскаго процесса, въ которомъ фосфоръ служитъ источникомъ тепла. Чугунъ же для основного мартеновскаго процесса можно получить почти изъ любой руды,

такъ какъ необходимое для этого процесса условіе—почти полное отсутствіе кремнія и сѣры въ чугунѣ — скорѣе зависитъ отъ способа веденія доменнаго процесса, чѣмъ отъ состава самой руды. Содержаніе же фосфора въ чугунѣ зависитъ исключительно отъ состава руды, такъ какъ при доменномъ процессѣ почти весь фосфоръ переходитъ въ чугунъ. Такимъ образомъ основной мартеновскій процессъ единственный, который даетъ возможность получать продажные сорта стали, т. е. съ меньшимъ, чѣмъ 0,10°/о, содержаніемъ фосфора, изъ чугуна, содержащаго болѣе, чѣмъ 1,80°/о фосфора.

Въ производствѣ кислый бессемеровскій процессъ самый дешевый, за нимъ слѣдуетъ основной бессемеровскій процессъ, а за нимъ основной мартеновскій процессъ, хотя разница и не очень велика. За ними въ порядкѣ стоимости слѣдуетъ кислый мартеновскій процессъ. Наиболѣе дорогой изъ всѣхъ—это тигельный процессъ. Для выдѣлки рельсовой стали примѣняется почти исключительно кислый или основной бессемеровскій процессъ.

За періодъ 1880—1901 гг. годовое производство мартеновской стали въ Соед. Штатахъ увеличилось по отношенію къ производству бессемеровской стали съ 9 до 53°/о, въ Великобританіи съ 24 до 205°/о. Въ трехъ странахъ, производящихъ наибольшее количество желѣзныхъ продуктовъ, въ Великобританіи, Соед. Штатахъ, Германіи и Люксембургѣ, взятыхъ вмѣстѣ, за періодъ 1880—1899 гг. производство кислой мартеновской стали увеличилось въ семь разъ, всѣхъ видовъ мартеновской стали въ шестнадцать разъ, кислой бессемеровской стали болѣе, чѣмъ въ три раза, производительность бессемеровскаго конвертера въ среднемъ возросла въ четыре раза, общее производство стали увеличилось въ пять разъ; въ 1880 г. только еще начали примѣнять основной мартеновскій и основной бессемеровскій процессы, а уже въ 1899 г. производство стали при помощи каждаго изъ нихъ сравнялось съ міровымъ производствомъ стали въ 1880 г. при помощи всѣхъ извѣстныхъ тогда процессовъ. Въ этихъ странахъ въ 1899 г., 43°/о общаго производства стали составляла сталь, полученная при помощи кислаго бессемеровскаго процесса, 20°/о при помощи основного бессемеровскаго процесса, 16,5°/о при помощи кислаго мартеновскаго процесса, 18,5°/о при помощи основного мартеновскаго процесса и немногимъ болѣе 1°/о при помощи тигельнаго и другихъ процессовъ.

Механическая обработка.

292) Пороки въ стальныхъ болванкахъ.—Главные изъ нихъ,—это усадочныя раковины, пузыри и ликвація.

293) Усадочныя раковины.—При отливкѣ расплавленной стали въ холодную чугунную изложницу (рис. 103) къ тому времени, T, когда образуется сравнительно прочная, неподдающаяся сжатію корка, внутренняя часть еще остается расплавленной. При дальнѣйшемъ охлажденіи расплавленная внутренняя часть, въ моментъ T гораздо болѣе горячая, чѣмъ внѣшняя часть, должна до полнаго охлажденія пройти болѣе значительный температурный интервалъ, чѣмъ послѣдняя. Въ силу этого, внутренняя часть должна подвергнуться большему сокращенію объема при охлажденіи, чѣмъ внѣшняя. Но внутренняя часть, подвергшаяся такому избыточному сокращенію, не будетъ въ состояніи вполнѣ заполнить пространство, ограниченное коркой, которое она заполняла въ моментъ T. Въ частности, надо замѣтить, что внутренняя часть подвергается этому избыточному сокращенію въ значительной мѣрѣ въ промежуткѣ времени между T и T_1, когда наступаетъ ея полное затвердѣваніе. Такимъ образомъ, въ моментъ T_1 затвердѣвшая внутренняя часть уже оказывается не въ состояніи заполнить пространство, ограничиваемое внѣшней коркой. Вслѣдствіе этого образуется глубокая грушевидная полость или усадочная раковина (C, рис. 4).

Болѣе медленное, а слѣдовательно и болѣе равномѣрное охлажденіе болванки можетъ способствовать уменьшенію размѣра усадочной раковины, такъ какъ образованіе ея вызывается различіемъ въ скорости охлажденія внутренней и внѣшней частей. Кромѣ того, глубокому проникaнію раковины можно помѣшать, задержавъ затвердѣніе верхней части болванки; это достигается, напр., предварительнымъ нагрѣваніемъ верхней части изложницы или тѣмъ, что болванку прикрываютъ большой массой горящаго топлива или расплавленнымъ шлакомъ.

Благодаря этому, верхняя часть болванки остается въ расплавленномъ состояніи и постепенно стекаетъ внизъ, заполняя раковину, образующуюся въ нижней, болѣе быстро охлаждающейся части болванки. При изготовленіи отливокъ изъ стали возникаетъ то же самое затрудненіе. Искусство отливки въ сильной степени состоитъ въ томъ, чтобы или предотвратить обра-

зованіе усадочныхъ раковинъ, или вызвать такое ихъ расположеніе, чтобы они оказались внѣ отливаемаго предмета по приданіи ему окончательной формы, или по крайней мѣрѣ чтобы они не оказывали вреднаго вліянія.

При изготовленіи броневыхъ плитъ изъ стальныхъ болванокъ, до 40% металла можетъ поступать въ бракъ вслѣдствіе пороковъ, вызываемыхъ усадочными раковинами. При затвердѣваніи, болванка всегда должна помѣщаться вертикально, чтобы раковина образовывалась въ верхнемъ ея концѣ. Конецъ этотъ не составляетъ труда отрѣзать и получить такимъ образомъ сплошную болванку. Если же болванкѣ дать затвердѣть въ горизонтальномъ положеніи, то раковина образуется почти по всей ея длинѣ, какъ это указано на рис. 104.

Процессъ Sauveur'а. Чтобы поддерживать верхнюю часть болванки въ расплавленномъ состояніи во время затвердѣванія



Рис. 104. Чертежъ, показывающій расположеніе раковины, при которомъ болванка на большей части своей длины оказывается испорченной.

нижней части и тѣмъ самымъ вызывать заполненіе раковины по мѣрѣ ея образованія, проф. Sauveur соединяетъ рядъ болваночныхъ изложницъ такимъ образомъ, что сталь переливается изъ первой изложницы во вторую, изъ второй въ третью и т. д. При такомъ расположеніи, верхняя часть болванокъ въ началѣ ряда при затвердѣваніи поддерживается въ расплавленномъ состояніи сталью, которая протекаетъ для наполненія изложницъ, находящихся въ концѣ ряда. Приложеніе этого метода къ тигельному процессу встрѣчаетъ извѣстное затрудненіе. Дѣло въ томъ, что содержимое отдѣльныхъ тиглей не строго одинаково, вслѣдствіе чего переливаніе стали изъ одной изложницы въ другую должно вызывать неоднородность состава каждой болванки. Это затрудненіе можно обойти, если передъ отливкой смѣшать содержимое нѣсколькихъ тиглей въ соотвѣтствующемъ резервуарѣ.

294) Газовые пузыри. — Желѣзо, подобно водѣ и многимъ другимъ веществамъ, въ расплавленномъ, т. е. жидкомъ, состояніи обладаетъ большей способностью растворять газы, напр., во-

дородъ и азотъ, чѣмъ въ твердомъ состоянiи. Вслѣдствiе этого, при затвердѣванiи, изъ желѣза выдѣляется избытокъ газа, поглощенный имъ въ расплавленномъ состоянiи. Этотъ газъ застрѣваетъ въ замерзающей массѣ металла и образуетъ пузыри (*A* и *B*, рис. 4). Какъ уже было указано, объемъ усадочной раковины соотвѣтствуетъ избыточному сокращенiю внутренней части болванки въ промежуткѣ времени между T и T_1; поэтому, пространству, занимаемому пузырями въ внутренней части болванки, должно отвѣчать такое же уменьшенiе объема раковины. Такимъ образомъ, чѣмъ больше объемъ пузырей, тѣмъ меньше въ общемъ должна быть раковина.

Расположенiе пузырей одинаково важно, какъ и ихъ количество. Внутренняя поверхность пузыря, расположеннаго по близости къ внѣшней коркѣ болванки (*A*, рис. 4), можетъ подвергнуться окисленiю подъ влiянiемъ продиффундировавшаго въ въ него атмосфернаго кислорода. Прокатка не въ состоянiи уничтожить такого пузыря, потому что стѣнки его, покрытыя слоемъ окиси, не могутъ свариться. Для сварки необходимымъ условiемъ является, чтобы металлъ обладалъ чистой поверхностью. Такой пузырь образуетъ неисправимую прослойку въ металлѣ. Глубоко расположенные пузыри (*B*, рис. 4) сравнительно безвредны, потому, что при ковкѣ или прокаткѣ стѣнки ихъ плотно свариваются, и они совершенно исчезаютъ. Въ случаѣ стали, которая подлежитъ прокаткѣ или ковкѣ, даже желательна извѣстная пористость, вызываемая образованiемъ пузырей, потому что въ противномъ случаѣ возникаетъ раковина по оси болванки, оказывающая на послѣднюю очень вредное влiянiе.

Количество газовыхъ пузырей можно уменьшить или даже вовсе предотвратить ихъ образованiе, присаживая къ расплавленному металлу передъ самымъ затвердѣванiемъ алюминiя или кремнiя, или того и другого вмѣстѣ. Обыкновенно бываетъ достаточно присадить около 0,002% алюминiя. Одинаковое дѣйствiе оказываетъ и присадка марганца. Повидимому, присадка этихъ металловъ съ одной стороны вызываетъ возстановленiе присутствующихъ въ чрезвычайно маломъ количествѣ окиси желѣза и окиси углерода, съ другой стороны увеличиваетъ способность металла къ растворенiю газовъ, благодаря чему онъ удерживаетъ въ растворѣ и послѣ затвердѣванiя газы, растворенные имъ въ жидкомъ состоянiи. Предотвращая, однако, образова-

ніе пузырей, тѣмъ самымъ способствуютъ увеличенію раковины; поэтому часто бываетъ выгоднѣе давать имъ образовываться, слѣдя только за тѣмъ, чтобы они были глубоко расположены. Въ случаѣ стали, которая поступаетъ въ прокатку или ковку, этого достигаютъ тѣмъ, что ее отливаютъ при сравнительно низкой температурѣ и ограничиваютъ содержаніе въ ней марганца и кремнія.

Brinell сообщаетъ слѣдующія данныя, полученныя на его заводѣ въ Fagersta, въ Швеціи. Если, при нормальныхъ условіяхъ, сумма процентнаго содержанія марганца и увеличеннаго въ 5,2 раза процентнаго содержанія кремнія составляетъ 2,05, то сталь получается свободная отъ газовыхъ пузырей, но съ нежелательно большой усадочной раковиной. Если сумма составляетъ 1,66, то образуется какъ разъ то небольшое количество едва замѣтныхъ пузырей, которое, будучи достаточнымъ, чтобы предотвратить образованіе большой раковины, въ то же время не оказываетъ вреднаго вліянія. Если сумма меньше 1,66, то пузыри располагаются близко къ внѣшней поверхности. При уменьшеніи же суммы до 0,28 получаются глубоко расположенные пузыри. Такимъ образомъ, сумма должна или составлять около 1,66, чтобы получилась сталь, не содержащая пузырей, или она должна составлять 0,28, чтобы получилась сталь съ безвредными, глубоко расположенными пузырями.

Эти числа, конечно, мѣняются въ зависимости отъ измѣненія условій производства. Въ общемъ, при болѣе высокой температурѣ отливки, а также при меньшемъ поперечномъ сѣченіи болванки или при примѣненіи нагрѣтыхъ или тонкостѣнныхъ изложницъ содержаніе кремнія и марганца должно быть соотвѣтственно меньше.

Brinell установилъ также, что прибавка алюминія въ количествѣ 0,0184% приблизительно оказываетъ тоже дѣйствіе, что и присутствіе марганца и кремнія въ пропорціи $Mn + 5{,}2\ Si = 1{,}66\%$, т. е., вызываетъ строеніе *B* (таблица 16). Разумѣется, алюминія въ стали не остается вовсе или остается очень мало, такъ какъ онъ окисляется въ окись алюминія, которая всплываетъ на поверхность расплавленнаго металла или покрываетъ стѣнки усадочной раковины.

Въ таблицѣ 16 и на рис. 105—111 приведены нѣкоторые изъ результатовъ, полученныхъ Brinell'емъ.

Таблица 16.

Вліяніе марганца и кремнія на образованіе газовыхъ пузырей и раковинъ.

Структура.	$Mn + 5{,}2 \times Si$.	Расположеніе пузырей.	Качество стали, поскольку касается пузырей и раковинъ.
	%		
A	2,05	Пузыри отсутствуютъ, небольшая раковина.	Испорчена раковиной.
B	1,66	Отсутствуютъ замѣтные пузыри и раковина.	Какъ разъ достаточно плотна; превосходна.
C	1,16	Внѣшніе пузыри, раковина отсутствуетъ.	Испорчена внѣшними пузырями.
D	0,50	Пузырей меньше и они глубже расположены.	Пузыри все еще слишкомъ близко къ поверхности.
E	0,28	Пузыри очень глубоко расположены.	Превосходна.
O	Отлита при слишкомъ высокой температурѣ.	Большое число внѣшнихъ пузырей и раковина.	Испорчена внѣшними пузырями.
H	Отлита при слишкомъ низкой температурѣ.	Много какъ внѣшнихъ, такъ и внутреннихъ пузырей.	Испорчена внѣшними пузырями.

Структура *O* и структура *H* вызваны соотвѣтственно слишкомъ высокой и слишкомъ низкой температурой отливки. Сталь, которая здѣсь обладаетъ структурой *O*, обладала бы структурой *A*, если бы была отлита при нормальной температурѣ. Полагаютъ, что чрезмѣрно высокая температура отливки вызываетъ образованіе внѣшнихъ пузырей вслѣдствіе того, что углеродъ расплавленной стали реагируетъ съ окисью желѣза, покрывающей стѣнки изложницы, при чемъ происходитъ окись углерода, которая и образуетъ эти пузыри.

Вѣскія причины препятствуютъ Brinell'ю [1]) рѣшить вопросъ, какова была бы структура стали, которая здѣсь обладаетъ структурой *H*, если бы она была отлита при нормальной температурѣ.

Вышеизложенное относится до стальныхъ болванокъ, которыя поступаютъ въ прокатку или ковку, и у которыхъ, слѣдо-

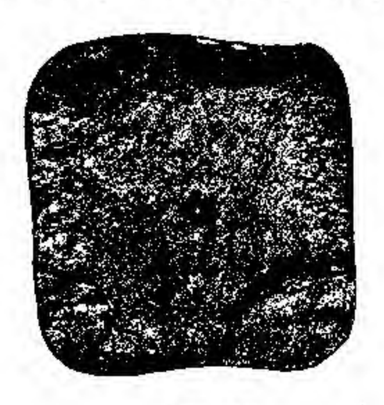


Рис. 105.
Структура *A*. Пузыри отсутствуютъ, небольшая усадочная раковина. Болванку портитъ раковина.
Mn + 5,2 Si = 2,05%.



Рис. 107.
Структура *C*. Внѣшніе пузыри. Раковина отсутствуетъ. Болванку портятъ внѣшніе пузыри.
Mn + 5,2 Si = 1,16%.

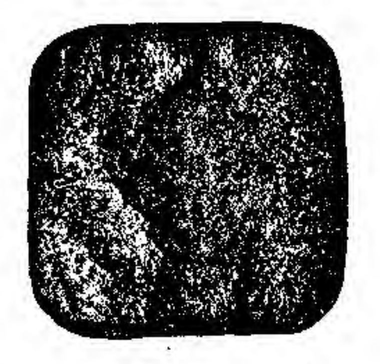


Рис. 106.
Структура *B*. Превосходна. Ни замѣтныхъ пузырей, ни раковины.
Mn + 5,2 Si = 1,66%.

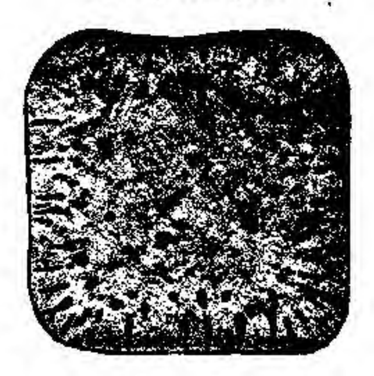


Рис. 108.
Структура *D*. Пузырей меньше и они болѣе глубоко расположены. Пузыри все еще слишкомъ близко къ поверхности.
Mn + 5,2 Si = 0,50%.

вательно, является возможнымъ уничтожить глубоко расположенные пузыри.

Въ случаѣ стальныхъ отливокъ, т. е. стальныхъ предметовъ, которымъ при отливкѣ придается окончательная форма, эта воз-

---

[1]) Частное сообщеніе, 31 дек. 1902.

можность отсутствуетъ. Здѣсь уже приходится заботиться о томъ, чтобы съ одной стороны эти пузыри не были видны снаружи и не обезображивали отливку, а съ другой стороны, чтобы



Рис. 109.
Структура *E*. Превосходна. Пузыри расположены очень глубоко.
Mn + 5,2 Si — 0,28%.

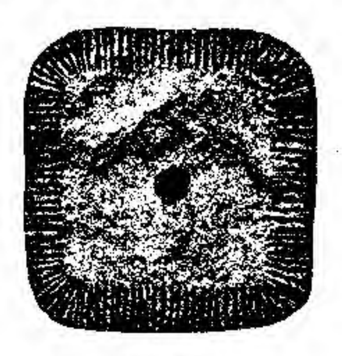


Рис. 110.
Структура *O*. Много внѣшнихъ пузырей и раковина. Болванку портятъ внѣшніе пузыри. Отлита при слишкомъ высокой температурѣ. Если бы температура была нормальна, структура была бы *A*.

они по своему расположенію ее значительно не ослабляли. Въ общемъ говоря, даже и глубоко расположенные пузыри нежелательны. Слѣдуетъ имѣть въ виду, что температура отливки часто должна быть очень высока, чтобы сталь могла заполнить до затвердѣванія всѣ узкія части формы.

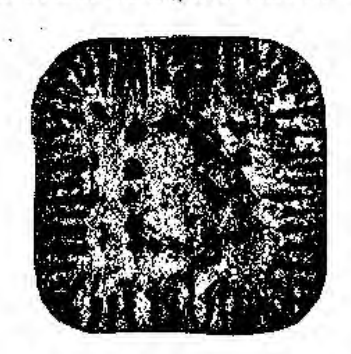


Рис. 111.
Структура *H*. Большое число внѣшнихъ пузырей и кольцо изъ внутреннихъ пузырей. Отлита при слишкомъ низкой температурѣ.

Помимо вышеуказанныхъ элементовъ, а также температуры и состава, которые оказываютъ вліяніе ма газовые пузыри, надо указать еще на то, что значительные наружные пузыри возникаютъ подъ вліяніемъ сырыхъ формъ; это обстоятельство сильно затрудняетъ примѣненіе формъ изъ сырого песка для стальныхъ отливокъ.

295) Ликвація (См. § 76 и 77).—Затвердѣваніе большой стальной болванки идетъ постепенно снаружи внутрь, причемъ при затвердѣваніи каждый слой стремится выдѣлить изъ себя въ находящуюся еще въ расплавленномъ состояніи внутреннюю

часть тѣ примѣси, которыя въ немъ содержатся, особенно углеродъ, фосфоръ и сѣру; послѣдніе, такимъ образомъ, концентрируются въ той части болванки, которая замерзаетъ послѣдней. Это явленіе извѣстно подъ названіемъ ликваціи.

Обыкновенно ликвація бываетъ рѣзче всего выражена вокругъ нижней части раковины; это служитъ также одной изъ причинъ, почему слѣдуетъ отбрасывать ту часть болванки, гдѣ находится раковина. Очевидно, что въ этомъ мѣстѣ ликвація вредно отзывается на металлѣ, сообщая ему неопредѣленный избытокъ фосфора и сѣры, но съ другой стороны она обусловливаетъ большую чистоту остальной части болванки. Поэтому иногда слѣдуетъ скорѣе способствовать ликваціи, чѣмъ ей препятствовать.

Примѣромъ крайне рѣзко выраженной ликваціи можетъ служить слѣдующій случай:

	Углеродъ.	Кремній.	Марганецъ.	Фосфоръ.	Сѣра.
Первоначальный составъ металла въ проц.	0,24	0,336	0,97	0,089	0,074
Составъ той части, гдѣ больше всего выражена ликвація.	1,27	0,41	1,08	0,753	0,418

296) Прессованіе стальныхъ болванокъ съ проволакиваніемъ [1]).—Обычный методъ или методъ Whitworth'а для уничтоженія раковинъ и газовыхъ пузырей состоитъ въ томъ, что цилиндрическую болванку подвергаютъ при затвердѣваніи сильному давленію, при чемъ послѣднее прилагается къ верхней ея части. Безъ внѣшняго воздѣйствія, охлаждаясь, болванка сокращалась бы какъ въ продольномъ, такъ и въ поперечномъ направленіи, изложница же бы одновременно расширялась подъ вліяніемъ тепла, получаемаго ею отъ болванки. Поперечное сжатіе болванки удаляетъ ее отъ стѣнокъ изложницы, поперечное же расширеніе изложницы удаляетъ ее отъ поверхности болванки. Такимъ образомъ существуетъ двойное стремленіе къ

[1]) Изъ статьи автора для «Report of the Commissioner-General for the United States to the International Universal Exposition», Paris, 1900, т. V.

образованію пустого пространства между болванкой и стѣнками изложницы. По системѣ Whitworth'a, болванка подвергается сдавливанію въ продольномъ направленіи, при чемъ она укорачивается и раздается, и тѣмъ самымъ компенсируется какъ продольное и поперечное ея сжатіе при охлажденіи, такъ и расширеніе изложницы. При этомъ болванка раздается до извѣстной степени подобно цилиндру изъ резины, но только до извѣстной степени. Ибо, при переходѣ изъ жидкаго въ твердое состояніе металлъ принимаетъ промежуточное тѣстообразное состояніе, при которомъ онъ уже утрачиваетъ подвижность, свойственную жидкому состоянію, и не обладаетъ еще тягучестью, которой отличается твердое состояніе. Именно въ этомъ состояніи чаще всего и происходитъ разрывъ металлическихъ отливокъ. Находящаяся въ этомъ состояніи болванка при продольномъ сдавливаніи испытываетъ то же, что̀ испытала бы бочка, не скрѣпленная обручами; подобно тому, какъ клепки послѣдней должны были бы разойтись, точно также и въ коркѣ болванки возникаютъ продольныя трещины. Нѣтъ сомнѣнія, что эти трещины въ сильной степени уменьшаютъ то усиліе, которое требуется для сдавливанія болванки, потому что растрескавшаяся корка представляетъ гораздо меньшее сопротивленіе, чѣмъ если бы она охватывала внутреннюю часть болванки въ видѣ сплошного цилиндра. Это явленіе имѣетъ, однако, и вредную сторону. Дѣло въ томъ, что когда корка трескается, то находящійся еще въ расплавленномъ состояніи металлъ осевой части болванки, болѣе богатый углеродомъ и фосфоромъ, вслѣдствіе ликваціи, выступаетъ черезъ эти трещины наружу и образуетъ продольныя прослойки иного состава, чѣмъ остальная часть корки. Если бы не эти трещины, то примѣси, сконцентрировавшіяся подъ дѣйствіемъ ликваціи, такъ и остались бы въ осевой части болванки, гдѣ ихъ присутствіе въ большинствѣ случаевъ не оказывало бы особаго вреда, потому что они находились бы вблизи нейтральной оси болванки; кромѣ того, часто, при просверливаніи болванки по продольной оси, они и совершенно удаляются. Короче говоря, болванка, раздаваясь, трескается, и это выгодно въ томъ отношеніи, что требуется меньшее усиліе для ея сдавливанія, но въ то же время вредно, потому что при этомъ выступаетъ наружу осевая часть металла, гдѣ рѣзче всего выражена ликвація. Раздается же болванка

потому, что она обладаетъ стремленіемъ отойти отъ стѣнокъ изложницы.

Описанныхъ явленій можно избѣжать при примѣненіи способа, принятаго въ St.-Etienne во Франціи (procédé de compression par tréfilage, Fonderies, Forges et Aciéries de Saint-Etienne). Способъ этотъ состоитъ въ томъ, что болванкѣ, которая подлежитъ сдавливанію, придаютъ при отливкѣ въ коническую изложницу форму усѣченнаго конуса. Затѣмъ, прилагая давленіе къ основанію болванки, вдавливаютъ ее въ эту изложницу. Если мы будемъ загонять конусообразную втулку въ конусообразное отверстіе, радіальное давленіе на стѣнки послѣдняго будетъ очень велико. Точно такъ же и здѣсь болванка испытываетъ огромное давленіе со стороны стѣнокъ изложницы. Умѣренное давленіе, приложенное къ основанію болванки, вызываетъ огромное радіальное давленіе на ея поверхность, вдавливаетъ ее и заставляетъ металлъ заполнять раковину тотчасъ по мѣрѣ ея образованія.

Критическій разборъ сравнительныхъ достоинствъ этого способа, а также способовъ Whitworth'a и S. T. Williams'a[1]) выходитъ за предѣлы даннаго труда. Укажемъ только на то, что прессованіе съ проволакиваніемъ, при правильномъ примѣненіи[2]), даетъ возможность избѣгнуть проступанія черезъ трещины металла изъ осевой части болванки, сопровождающаго прессованіе большихъ болванокъ по способу Whitworth'a, а также и по способу Williams'a. Кромѣ того, при прессованіи съ проволакиваніемъ вовсе не требуется прилагать къ концу болванки такого большого усилія, какъ при прессованіи по способу Whitworth'a, ибо при первомъ усиленіе давленія, вызываемое конической формой изложницы, должно перевѣшивать увеличеніе сопротивленія, обусловливаемое 1) конической формой изложницы, 2) тѣмъ, что стѣнки болванки остаются цѣльными и не трескаются, какъ при способѣ Whitworth'a, 3) сопротивленіемъ твердаго основанія болванки сдавливанію. Однако, все

---

[1]) Патентъ въ Соед. Штатахъ 331856, 8 декабря 1885.

[2]) При правильномъ примѣненіи, такъ какъ сдавливаніе верхней части должно сопровождаться ея проволакиваніемъ, а для этого вся болванка должна продвигаться вдоль изложницы. Для того же, чтобы проволакиваніе было одинаково какъ въ верхней, такъ и въ нижней части болванки, стѣнки изложницы должны не только образовать конусъ, но и быть вогнутыми.

же при этомъ способѣ требуется гораздо большее давленіе, чѣмъ при очень дѣйствительномъ способѣ прессованія болванокъ, предложенномъ Williams'омъ.

297) Подогрѣвательныя печи. — Очень большое значеніе имѣло введеніе въ практику теплоуравнительнаго колодца Gjers'a, а также дальнѣйшее развитіе, которое получили непрерывно дѣйствующія печи или печи типа Eckman'a. Въ то время, какъ внѣшняя корка стальной болванки при охлажденіи достигаетъ уже значительной прочности, внутренняя ея часть находится еще при гораздо болѣе высокой температурѣ, чѣмъ это допустимо для прокатки или проковки. Указанная разница настолько велика, что избытка теплоты внутренней части было бы болѣе чѣмъ достаточно для того, чтобы нагрѣть внѣшнюю корку до температуры, требуемой для прокатки, если бы мы только могли остановить или сильно задержать отдачу теплоты этою коркой. Такимъ образомъ, для того, чтобы довести такую болванку до температуры прокатки, вовсе не надо ее нагрѣвать, такъ какъ средняя ея температура даже выше той, которая требуется; надо дать только возможность температурѣ равномѣрно распредѣлиться по всей массѣ болванки.

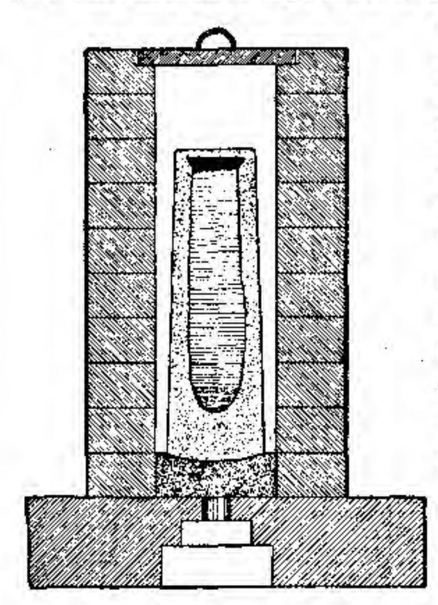


Рис. 112. Колодезь Gjers'a. (Soaking Pit.).

Gjers достигаетъ этого, помѣщая не вполнѣ затвердѣвшія болванки въ хорошо защищенный «колодезь» изъ кирпича, нагрѣтый избыточнымъ тепломъ предыдущаго ряда болванокъ. Такое устройство (рис. 112) имѣетъ три преимущества, 1) болванка доводится до желаемой температуры безъ всякаго расхода топлива; 2) потеря желѣза, вызываемая окисленіемъ внѣшней корки болванки, очень мала, потому что небольшое количество атмосфернаго кислорода, которое находится въ колодцѣ, не возобновляется, тогда какъ въ обыкновенной подогрѣвательной печи всегда есть притокъ свѣжаго запаса кислорода; 3) при охлажденіи болванки

остается въ вертикальномъ положеніи, благодаря чему усадочная раковина получается въ верхней ея части, которая можетъ быть отрѣзана (см. § 293). Въ такомъ видѣ эта система не совсѣмъ удобна, потому что въ случаѣ задержки при подачѣ болванокъ колодцы слишкомъ остываютъ; вслѣдствіе этого слѣдующая партія болванокъ или недостаточно прогрѣвается, или выравниваніе температуры занимаетъ слишкомъ много времени. Для устраненія этого недостатка въ настоящее время обыкновенно прибѣгаютъ къ нагрѣванію колодцевъ при помощи регенеративной системы Сименса (§ 279). Достигаемая такимъ путемъ бо́льшая приспособляемость системы перевѣшиваетъ какъ расходъ на топливо, такъ и потерю желѣза вслѣдствіе окисленія его генераторнымъ газомъ.

Система Gjers'а неприложима къ болванкамъ небольшого размѣра или къ такъ называемымъ «заготовкамъ» (billets)[1], потому что они не обладаютъ избыткомъ внутренняго тепла, подобно большимъ болванкамъ. По этой причинѣ въ настоящее время заготовкамъ даютъ передъ прокаткой вполнѣ охладиться. Подогрѣваніе заготовокъ для дальнѣйшей прокатки сопровождается очень большой потерей тепла, если вести его не непрерывно, т. е. загружать въ подогрѣвательную печь партію заготовокъ, нагрѣвать ее до температуры прокатки и затѣмъ всю заразъ извлекать изъ печи для прокатки; ибо только въ первый періодъ нагрѣванія поверхность болванокъ достаточно холодна, чтобы утилизировать все тепло пламени. По мѣрѣ дальнѣйшаго хода нагрѣванія температура болванокъ становится все ближе къ температурѣ пламени, и утилизація тепла непрерывно уменьшается. При такой системѣ, слѣдовательно, большая часть тепла, развиваемаго въ печи, ускользаетъ съ продуктами горѣнія. При системѣ же непревывнаго нагрѣванія (рис. 113) это тепло улавливается, потому что пламя приходитъ въ соприкосновеніе послѣдовательно съ все менѣе нагрѣтыми заготовками, *A*—*F*, и въ концѣ концовъ съ совершенно холодными, а слѣдовательно и лучше всего поглощающими тепло.

---

[1]) Billets—это бруски съ поперечнымъ сѣченіемъ отъ 2 до 6 кв. дюймовъ, которые представляютъ собой промежуточный продуктъ, получаемый при прокаткѣ большихъ болванокъ. Изъ нихъ далѣе прокаткой получаются прутья, листы и т. п.

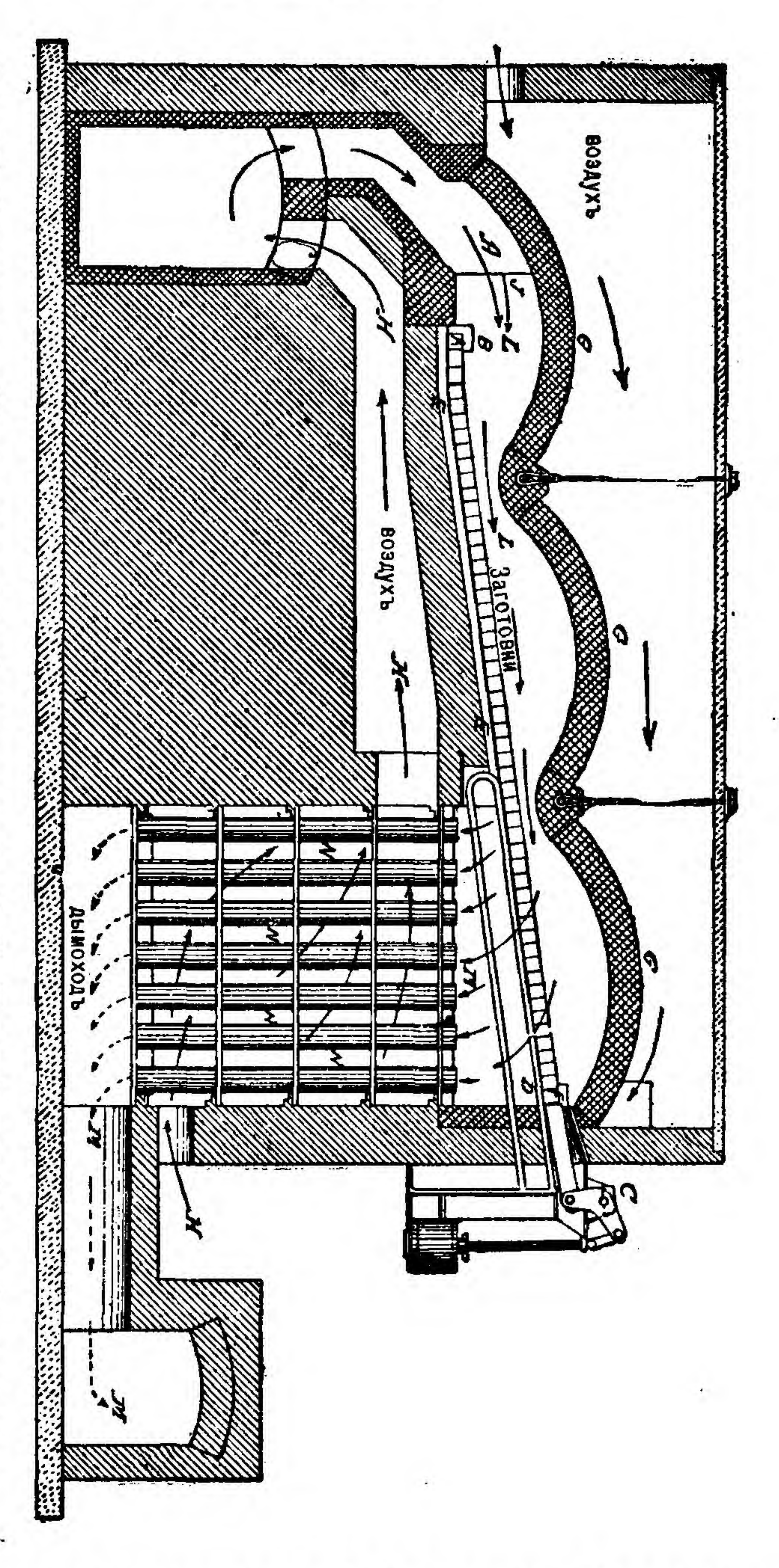


Рис. 113. Непрерывно дѣйствующая подогрѣвательная печь C. H. Morgan'a для 2-хъ дюйм. заготовокъ, длиною 30 ф.

A—наиболѣе горячая заготовка, готовая для прокатки; *B*—выходная дверца; *C*—поршень для продвиганія заготовокъ; *D*—охлаждаемыя водою трубы, по которымъ продвигаются заготовки; *E*—магнезитовые кирпичи, по которымъ скользятъ горячія заготовки; *F*—заготовка, поступившая въ печь послѣдней; *G*—подвѣсная крыша; *H*—поступающій воздухъ, подогрѣтый въ *G* и въ трубахъ *N*; *J*—поступающій газъ; *L*—пламя *M*—удаляющіеся продукты горѣнія; *N*—трубы, по которымъ проходятъ продукты горѣнія. Во многихъ изъ такихъ рекуперативныхъ печей, продукты горѣнія проходятъ вокругъ трубъ, тогда какъ подогрѣваемый воздухъ проходитъ внутри трубы.

Вытащивъ горячую заготовку *A* изъ оконца *B*, продвигаютъ при помощи механическаго приспособленія *C* весь рядъ заготовокъ; послѣднія скользятъ по наклоннымъ трубкамъ *D*, охлаждаемымъ циркулирующей въ нихъ водой, а въ болѣе го-

рячей части печи по магнезитнымъ кирпичамъ *E*. Желѣзо, будучи до-красна накалено, легко скользитъ по кирпичамъ. Затѣмъ въ верхній конецъ печи загружается новая холодная заготовка, черезъ *B* вытаскиваютъ слѣдующую нагрѣтую заготовку и т. д. Чтобы уменьшить потери въ видѣ концевыхъ отрѣзковъ и вообще для экономіи, эти заготовки иногда дѣлаютъ длиною до 30 футъ (напр., какъ это указано на рис. 113). Съ цѣлью сдѣлать печь достаточно обширной для вмѣщенія такихъ длинныхъ заготовокъ, крыша ея подвѣшивается, какъ это здѣсь изображено, на двухъ рядахъ желѣзныхъ канатовъ.

Какъ только конецъ заготовки покажется изъ печи, онъ поступаетъ въ первый изъ ряда прокатныхъ становъ, затѣмъ тотчасъ поступаетъ въ слѣдующій и т. д. Такимъ образомъ прежде, чѣмъ заготовка до половины покажется изъ печи, ея переднему концу уже придается прокаткой окончательный видъ сравнительно тонкаго, круглаго или квадратнаго сѣченія прута, длиною въ 300 футъ.

Правда, при системѣ не непрерывнаго нагрѣванія, уходящее тепло можно утилизировать подъ паровыми котлами или улавливать при помощи регенераторовъ Сименса. Но по всей вѣроятности утилизація тепла при примѣненіи регенераторовъ должна быть не такъ полна, какъ при системѣ непрерывнаго нагрѣванія. Ибо въ послѣднемъ случаѣ тепло передается металлу пламенемъ непосредственно, во второмъ же при посредствѣ регенераторовъ. Кромѣ того, вѣроятно, кирпичная кладка регенераторовъ хуже улавливаетъ тепло, чѣмъ желѣзныя заготовки при непрерывной системѣ нагрѣванія. Если сравнивать способность кирпичной кладки улавливать тепло съ холоднымъ желѣзомъ, то, вѣроятно, окажется, что недостатки кирпича—плохая теплопроводность и малая теплоемкость—перевѣшиваютъ его преимущества—неровную поверхность и пористость.

298) Прокатныя мастерскія.—Мастерскія, устроенныя по типу Bedson'а, гдѣ прокатка ведется непрерывнымъ способомъ (изъ стана въ станъ), получили широкое распространеніе. Въ такія мастерскія поступаютъ заготовки, имѣющія въ сѣченіи до 4 на $5^3/_4$ дюйма, и прокатываются въ листы, полосы, ленты для связыванія хлопковыхъ кипъ и другіе продукты важнаго значенія. При этой системѣ прокатные станы располагаются однимъ за другимъ, а не, какъ обычно, въ рядъ. Передній конецъ данной

стальной заготовки пропускается черезъ одну пару валковъ, затѣмъ немедленно черезъ другую и такъ далѣе и, пройдя черезъ послѣднюю, имѣетъ въ діаметрѣ, скажемъ, три четверти дюйма, тогда какъ задній конецъ заготовки еще не поступилъ въ первую пару валковъ, или даже еще не показался изъ подогрѣвательной печи. Благодаря тому, что почти вовсе не теряется времени между послѣдовательными пропусками, является возможнымъ въ одинъ пріемъ прокатывать большія болванки въ тонкіе очень длинные прутья и тѣмъ самымъ сильно уменьшать потерю металла въ видѣ концевыхъ отрѣзковъ. Когда прутъ получится достаточно тонкій, чтобы его можно было сгибать, дальнѣйшую прокатку можно вести по бельгійской системѣ, при которой прокатные станы размѣщаются не одинъ за другимъ, а въ рядъ; передній конецъ прута по выходѣ изъ-подъ одной пары валковъ сгибается въ ручную или механически на 180° и пропускается вновь черезъ тотъ же станъ.

Комбинируя эти двѣ системы, изъ которыхъ одна разработана C. H. Morgan'омъ, другая W. Garrett'омъ, прокатываютъ въ одинъ пріемъ заготовки 3 × 3 дюйма въ пруты діаметромъ въ $^3/_4$ дюйма и длиною около 230 футъ.

299) Молоты и гидравлическіе прессы.—Спросъ на очень большія поковки, въ особенности на броневыя плиты и орудія, повелъ за собою постройку огромныхъ паровыхъ молотовъ. Падающая часть наибольшихъ изъ нихъ, напр. въ Bethlehem, Pa., вѣситъ до 125 тоннъ. Но даже такой громадный молотъ представляетъ собой не особенно дѣйствительное орудіе для проковки большихъ предметовъ, потому что дѣйствіе его удара сосредоточивается на поверхности поковокъ и не проникаетъ въ достаточной мѣрѣ въ глубину. Повидимому, дни большихъ паровыхъ молотовъ сочтены.

Въ частности, указанный выше молотъ былъ замѣненъ гидравлическимъ прессомъ, развивающимъ давленіе до 14,000 тоннъ. Этотъ прессъ приводится въ дѣйствіе водой подъ давленіемъ въ 7,000 футовъ на кв. дюймъ, подаваемой насосами въ 16,000 лошадиныхъ силъ. Для проковки валовъ и другихъ предметовъ, которые не легко выдѣлывать при помощи прокатки, такъ какъ сѣченіе ихъ не однородно, гидравлическій прессъ, повидимому, нашелъ очень прочное примѣненіе и далеко

Таблица 17.

Пониженіе стоимости производства желѣзныхъ продуктовъ въ Америкѣ.—C. Kirchoff.

МѢСТНОСТЬ.	ПРОИЗВОДСТВО.	Періодъ времени.		Стоимость, прибыль и производительность къ концу періода, выраженныя въ процентахъ таковыхъ же въ началѣ періода.						
				Стоимость:						
		Отъ	До	Руды.	Топлива.	Работы.	Общая.	Общая за искл. сырыхъ матеріаловъ.	Прибыль на тонну.	Суточная производительность печи и т. п.
Большой заводъ на югѣ .	Производство чугуна . .	1889	1898	79	64,1	51,9	63,4	—	47,9	167,7
Сѣверо-восточный раіонъ	» » . .	1890	1898	103,7	97	61,1	65,8	—	33,9	163,3
Питтсбургскій раіонъ . .	» » . .	1887	1897	—	—	46	—	44	—	—
Восточный раіонъ. . . .	Производство бессемеровскихъ стальныхъ болванокъ	1891	1898	—	—	75	64,39	—	—	107
Питтсбургъ	Производство бессемеровскихъ стальныхъ болванокъ	1887	1897	—	—	—	—	52	—	—
Не указано	Прокатка прутьевъ для проволоки	1888	1898	—	—	—	63,6	—	—	325

оставляетъ за собой по удобству всѣ остальныя приспособленія.

Хотя *большой*, въ 14,000 тоннъ, прессъ въ Bethlehem'ѣ съ успѣхомъ примѣняется и для выдѣлки броневыхъ плитъ съ однороднымъ сѣченіемъ, однако въ этомъ случаѣ прокатные станы обладаютъ извѣстными преимуществами. На заводѣ Круппа вся броневая плита получается теперь путемъ прокатки, при чемъ діаметръ валковъ достигаетъ 4 футъ, длина ихъ 12 футъ, толщина же болванокъ, поступающихъ въ прокатку, доходитъ до 4 футъ.

Статистическія данныя.

300) Стоимость производства.—Стоимость производства желѣза и стали понизилась чрезвычайно сильно, какъ это можно видѣть изъ таблицы 17, гдѣ приведено нѣсколько примѣровъ изъ американской практики. Здѣсь можно видѣть, что пониженіе общей стоимости производства достигло 35%, стоимость же работы понизилась еще больше, въ одномъ случаѣ на 54% за періодъ отъ семи до десяти лѣтъ. Стоимость работы понизилась вслѣдствіе улучшеній въ администраціи и примѣненія механическихъ приспособленій, а не *вслѣдствіе* пониженія заработной платы.

Согласно Carnegie, на одномъ изъ самыхъ большихъ американскихъ желѣзодѣлательныхъ заводовъ, средній заработокъ всѣхъ лицъ, получающихъ поденную плату, включая сюда, рабочихъ, механиковъ и мальчиковъ, въ 1901 г. составлялъ болѣе 4 долларовъ въ день, принимая въ году 311 рабочихъ дней. Насколько стали выгодны пріемы добычи руды, доставки ея и переработки, указываетъ хотя бы то, что, согласно Carnegie, стальныя заготовки не безъ выгоды продавались по 13,96 долларовъ за тонну и въ очень большомъ количествѣ по 15 долларовъ за тонну. При этомъ надо имѣть въ виду, что въ стоимость каждой тонны входила добыча и перевозка за 1,000 миль 2 тоннъ руды, добыча и коксованіе 1,3 тонны угля и перевозка кокса за 50 миль, выломка $^1/_3$ тонны известняка и перевозка его за 140 миль, помимо расходовъ на выплавку руды, переработку получающагося чугуна на сталь и прокатку стали въ рельсы.

Таблица 18 указываетъ пониженіе цѣнъ. Цѣна на сварочное желѣзо достигла въ Филадельфіи 155 долларовъ въ 1815 г., затѣмъ понизилась до 80 долларовъ и вновь достигла 115 долларовъ 1837 г. Бессемеровскіе рельсы продавались при обезцѣненной валютѣ 1868 г. по 174 доллара, по 17 долларовъ въ 1898 г. и по 28 долларовъ въ 1901 г.

Обращаемъ вниманіе на то, что эти цѣны являются крайними, тогда какъ приводимыя въ таблицѣ 18 представляютъ собой среднія цѣны за годъ.

Таблица 18.

Пониженіе цѣнъ на нѣкоторые продукты [1]).

ГОДЪ.	Средняя цѣна въ Пенсильваніи за тонну въ 2245 фунтовъ.			
	Сварочное желѣзо.	Желѣзные рельсы.	Стальные рельсы.	№ 1 Литейный чугунъ.
1800, январь	100 (Лучшее кованое)	—	—	—
1815, февраль	155 (Лучшее кованое)	—	—	—
1824, ноябрь	80 (Лучшее кованое)	—	—	—
1837, апрѣль	115 (Лучшее кованое)	—	—	—
1850, средняя	59,54 (Прокатанное)	47,88	—	20,88
1865 »	106,38 (Прокатанное)	98,62	158,50 [2])	40,12
1870 »	78,96 (Прокатанное)	72,25	106,75	33,25
1880 »	60,38 (Прокатанное)	49,25	67,50	28,50
1890 »	45,92 (Прокатанное)	—	31,75	18,40
1898 »	23,97 (Прокатанное)	—	17,62	11,66
1899 »	43,68 (Прокатанное)	—	28,12	19,36
1900 »	48,16 (Прокатанное)	—	32,29	19,98
1901 »	40,32 (Прокатанное)	—	27,33	15,87

301) Ростъ производства.—Въ 1810 г. производство чугуна въ Соед. Штатахъ составляло около 7% мірового производства, въ 1830, 1850 и 1860 гг. почти что 10%; въ 1820 г. производство чугуна въ Соед. Штатахъ составляло около одной трети ихъ производства въ 1810 г. По окончаніи междуусобной войны производство начало увеличиваться скачками и въ 1901 г. уже стало въ 19 разъ больше, чѣмъ въ 1865 г. Оно составляло

1) Въ долларахъ.

2) 1867 г.

14°/₀ мірового производства въ 1870 г., 21°/₀ въ 1880 г. и 34°/₀ въ 1899—1900 гг. Между 1880 и 1901 гг. производство чугуна въ Великобританіи возросло на 21°/₀, въ Соед. Штатахъ болѣе, чѣмъ учетверилось, въ Германіи и Люксембургѣ почти утроилось, мировое же производство болѣе, чѣмъ удвоилось. Производство стали возрасло еще болѣе рѣзко. Въ 1901 г. въ Соед. Штатахъ оно было почти въ 1,000 разъ больше, чѣмъ въ 1865 г. Въ 1865 г. производство стали въ Соед. Штатахъ составляло 3°/₀ мірового производства, въ 1870 г.—10°/₀, въ 1880 - 30°/₀, въ 1890 г.—36°/₀ и въ 1900 г.—38°/₀. Между 1880 и 1901 гг. производство стали въ Великобританіи возросло почти въ четыре раза, въ Соед. Штатахъ почти въ одиннадцать разъ. Какъ уже было указано, изъ общаго количества производимыхъ въ Соед. Штатахъ сварочнаго желѣза и стали, сталь составляла 2°/₀ въ 1865 г., 37°/₀ въ 1880 г. и около 85°/₀ въ 1899 г. За эти 19 лѣтъ вѣкъ желѣза перешелъ въ вѣкъ стали.

Потребленіе желѣза на одного жителя въ Великобританіи составляло, за исключеніемъ экспорта, 144 фунта въ 1855 г., 250 фунтовъ въ 1890 г. и 292 фунта въ 1900 г., въ Соед. Штатахъ 62 фунта въ 1850 г., 318 фунтовъ 1890 г., 387 фунтовъ въ 1900 г. и 464 фунта въ 1901 г. или въ семь съ половиною разъ больше, чѣмъ съ 1850 г. Среди главныхъ причинъ, обусловливающихъ ростъ потребленія желѣза можно указать, помимо общаго увеличенія богатства и успѣховъ цивилизаціи, на то, что промышленность отвлекаетъ все большее число людей отъ занятія земледѣліемъ. Всѣ же почти машины, которыя требуются для промышленныхъ цѣлей, дѣлаются изъ желѣза. Кромѣ того, на ростъ потребленія желѣза оказала сильное вліяніе замѣна дерева желѣзомъ для постройки судовъ и мостовъ; широкое примѣненіе желѣза для балокъ, колоннъ и другихъ частей при постройкахъ зданій; развитіе желѣзныхъ и электрическихъ дорогъ; введеніе проволочныхъ изгородей.

Значеніе Германіи и Люксембурга, какъ производителей желѣза, возросло въ сильной степени вслѣдствіе изобрѣтенія основныхъ бессемеровскаго и мартеновскаго процессовъ Thomas'омъ, благодаря чему фосфористыя руды этихъ странъ пріобрѣли огромную цѣнность. Соед. Штаты обязаны развитіемъ производства отчасти увеличенію своего населенія; широкому масштабу, по которому ведется производство; открытію дешевыхъ,

богатыхъ рудъ въ области Mesabi у Верхняго Озера. Но, при всѣхъ этихъ благопріятныхъ условіяхъ, тѣ тысячи миль, которыя отдѣляютъ залежи руды Верхняго Озера отъ дешеваго угля Пенсильваніи, оказали бы очень серьезное вліяніе на развитіе американской желѣзодѣлательной промышленности, если бы не произошло такого удивительнаго удешевленія перевозки. А такъ какъ послѣднее вызвано тѣмъ же классомъ людей, которые развили и желѣзодѣлательную промышленность, то при дальнѣйшемъ анализѣ, безъ сомнѣнія, придется заключить, что это развитіе надо приписать въ значительной степени расовымъ качествамъ. То же самое можно сказать и относительно развитія германской желѣзодѣлательной промышленности. Интересно отмѣтить, что въ трехъ близкихъ по крови странахъ—Великобританіи, Соед. Штатахъ, Германіи и Люксемургѣ—въ 1900 г. производство чугуна составляло 77%, стали 79% мірового производства. Кромѣ того, замѣтимъ, что тѣ четыре процесса, при помощи которыхъ выдѣлывается почти вся сталь и сварочное желѣзо—пудлинговый, тигельный, основной и кислый бессемеровскій и мартеновскій процессы, а также паровой молотъ и валки съ ручьями для прокатки стали и желѣза—были изобрѣтены британцами (если можно за таковаго считать Sir C. W. Siemens'a). Только въ случаѣ мартеновскаго процесса Великобританія должна дѣлить честь изобрѣтенія съ Франціей.

ГЛАВА ДВѢНАДЦАТАЯ.

Доменная печь.

302) Доменная печь представляетъ собой огромную шахтенную печь, высота которой во многихъ случаяхъ достигаетъ 100 футъ и максимальный внутренній діаметръ 25 футъ. Общій видъ доменной печи представленъ на рис. 89, но детали ея измѣняются въ зависимости отъ мѣстныхъ условій, а еще болѣе отъ традицій.

Печь, во время работы, всегда наполнена сверху до низа коксомъ или другимъ топливомъ, известнякомъ и желѣзной рудой (рис. 114). Какъ будетъ, однако, вскорѣ указано, въ нижней ея части находится только топливо. Руда, флюсъ и топливо засыпаются сверху при помощи загрузочнаго аппарата и образуютъ непрерывный столбъ, простирающійся отъ верхняго конца печи до ея дна. Черезъ отверстія, находящіяся у дна печи и называемыя фурмами, вводится мощное дутье, обыкновенно сильно подогрѣтое. Подъ вліяніемъ послѣдняго происходитъ сгораніе топлива и развивается очень высокая температура, достаточная для того, чтобы плавилась руда, желѣзо которой ко времени достиженія ею этой области возстанавливается до металлическаго состоянія. Такимъ образомъ, весь этотъ столбъ, состоящій изъ твердыхъ веществъ, медленно опускается, по мѣрѣ того, какъ понемногу съѣдается его нижній конецъ; топливо, содержащееся въ немъ, сгораетъ подъ вліяніемъ дутья,

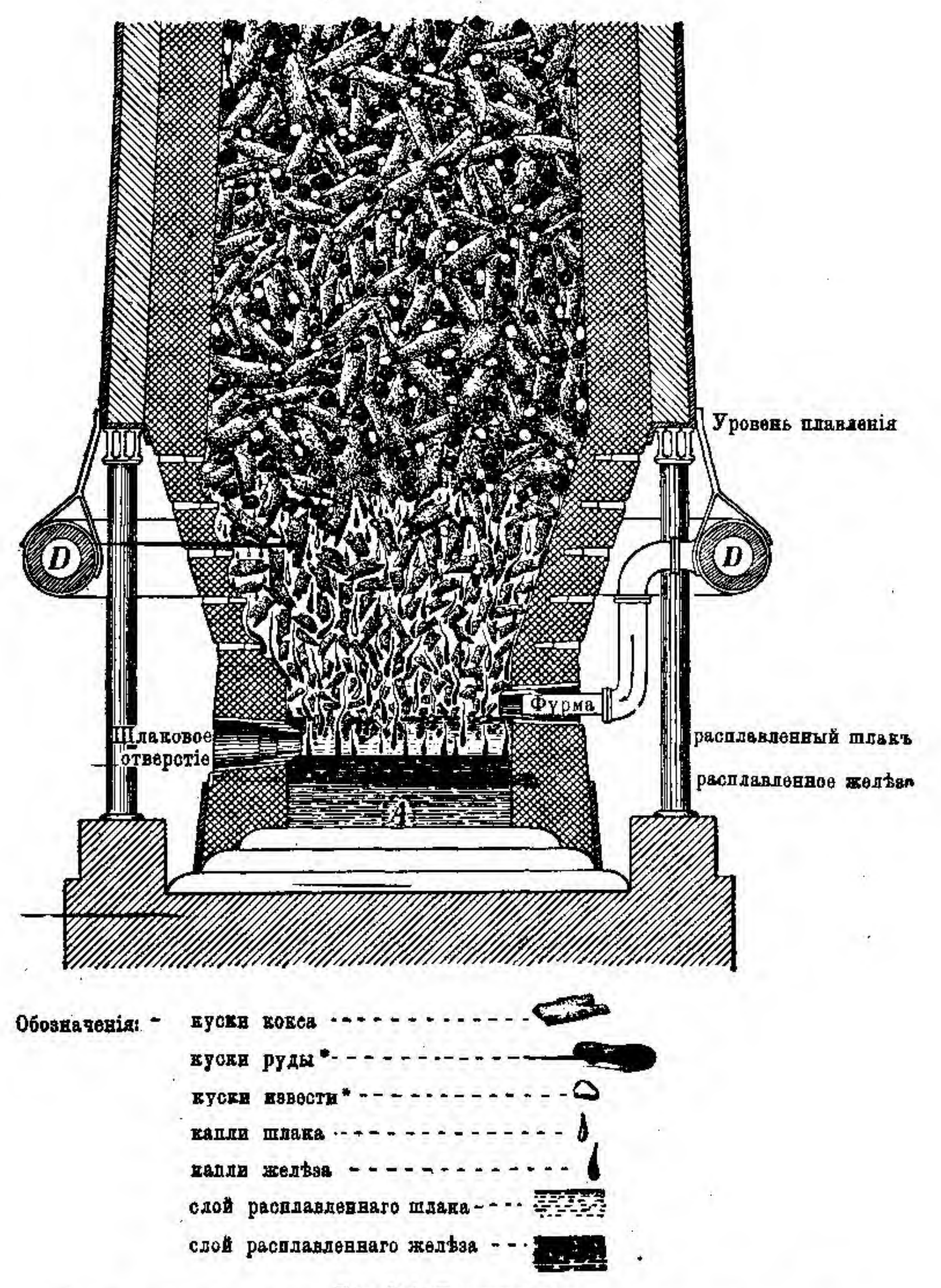


Рис. 114. Доменная печь.

* На самомъ дѣлѣ руда и известь находятся здѣсь не въ кускахъ, а въ порошкѣ. Онѣ изображены здѣсь въ видѣ кусковъ вслѣдствіе того, что представить ихъ на рисункѣ въ видѣ порошка очень затруднительно.

а остальныя вещества сплавляются вслѣдствіе высокой температуры, развиваемой горѣніемъ этого топлива.

Нѣкоторое представленіе о ходѣ этихъ процессовъ можетъ дать рис. 114, на которомъ представлена нижняя часть печи. Выше «уровня плавленія» видны куски кокса, а также куски руды и известняка (руда и известнякъ изображены здѣсь въ видѣ кусковъ, на самомъ же дѣлѣ они засыпаются измельченными).

Немного ниже уровня плавленія въ твердомъ состояніи находится только коксъ, такъ какъ здѣсь уже температура настолько высока, что все остальное, кромѣ кокса, плавится и стекаетъ по каплямъ на дно печи. Вѣроятно, дѣло обстоитъ приблизительно такъ, какъ это изображено на рисункѣ [1]).

---

[1]) Вполнѣ естественно было бы предположить, что нижняя часть столба изъ кокса, известняка и руды проникаетъ черезъ расплавленное желѣзо и покоится на самомъ днѣ печи, такъ какъ вѣсъ этого столба оказываетъ огромное давленіе.

Для нашихъ настоящихъ цѣлей совершенно несущественно, простирается ли коксъ до самого дна печи или, погружаясь въ шлакъ, только доходитъ до извѣстнаго уровня. Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ коксъ долженъ дѣйствовать сильно возстановляющимъ образомъ на шлакъ и энергично науглероживать желѣзо, по мѣрѣ того, какъ послѣднее стекаетъ по немъ внизъ отъ уровня плавленія.

Нельзя однако не указать на то, что нѣкоторые металлурги, основываясь на объемѣ горна доменной печи и на количествѣ расплавленнаго металла и шлака, вытекающихъ при каждомъ выпускѣ, полагаютъ, что коксъ не проникаетъ черезъ расплавленное желѣзо. Конечно, если бы столбъ кокса проникалъ до низа и покоился на днѣ печи, онъ занималъ бы по крайней мѣрѣ половину объема горна и уменьшалъ бы очень сильно пространство, служащее для скопленія расплавленнаго желѣза и шлака. На первый взглядъ кажется невѣроятнымъ, чтобы столбъ изъ твердыхъ матеріаловъ такого огромнаго вѣса могъ висѣть на воздухѣ, подобно гробу Магомета, не покоясь на прочномъ основаніи. Обычное объясненіе, что коксъ легче расплавленнаго желѣза и потому не можетъ оставаться погруженнымъ въ него, совершенно несостоятельно. Дерево легче воды. Однако, положимъ, что на днѣ печи стоитъ вода на два фута и что мы до верха загрузимъ печь кусками дерева. Вышенаходящееся дерево будетъ оказывать такое давленіе на нижній конецъ столба, что послѣдній окажется погруженнымъ въ воду и будетъ покоиться на днѣ печи.

J. E. Johnson, Jr., предлагаетъ вполнѣ логичное объясненіе. Оно состоитъ въ слѣдующемъ:

Часть вѣса столба уравновѣшивается треніемъ о стѣнки печи, оказывающія сдавливающее дѣйствіе. Другая же часть, повидимому, главнымъ обра-

Этотъ рисунокъ есть не что иное, какъ схема. Въ частности руду и известь надо было бы изображать въ видѣ порошка, а не кусковъ, потому что ни та, ни другая, вѣроятно, не достигаютъ этой части печи въ видѣ кусковъ. Вѣроятно, ко времени достиженія этого уровня онѣ оказываются уже истертыми въ порошокъ. Однако, я не представляю себѣ, какъ можно было бы ихъ удобно представить на рисункѣ въ видѣ порошка. Динамическія же условія, господствующія здѣсь, бурный токъ газа кверху и струи стекающихъ расплавленныхъ веществъ превышаютъ мои способности къ рисованію.

Помимо опускающагося столба твердыхъ веществъ, мы имѣемъ еще подымающійся столбъ горячихъ газовъ. Кислородъ дутья, поступающій черезъ сопла, чрезвычайно быстро даетъ окись углерода, соединяясь съ углеродомъ топлива, которое онъ встрѣчаетъ на своемъ пути. Для цѣлей настоящаго изложенія собственно несущественно, идетъ ли эта реакція непосредственно—

[25] . . . . $C + O = CO$

или сперва углеродъ образуетъ угольную кислоту

[26] . . . . $C + 2O = CO_2$,

которая тотчасъ возстановляется въ окись углерода, приходя въ соприкосновеніе съ коксомъ,

[27] . . . . $CO_2 + C = 2CO$.

Достаточно сказать, что атмосферный кислородъ очень скоро по своемъ вступленіи черезъ сопла образуетъ окись углерода и вмѣстѣ съ атмосфернымъ азотомъ дутья съ огромной скоростью подымается кверху черезъ печь. Такимъ образомъ, мы имѣемъ въ печи два столба, двигающихся въ противуположныхъ направленіяхъ: столбъ руды, флюса и топлива, опускающійся

зомъ уравновѣшивается треніемъ подымающихся кверху газовъ. Наблюдаемое на самомъ дѣлѣ уменьшеніе давленія газовъ при прохожденіи отъ дна до верха печи настолько велико, что треніе ихъ, безъ сомнѣнія, должно играть большую роль при поддержкѣ столба твердыхъ матеріаловъ. Этотъ случай можно до извѣстной степени сравнить съ продуваніемъ газа черезъ пористый клинъ.

Соображенія эти приводятся для того, чтобы показать, съ какой осторожностью надо относиться къ обсужденію явленій, которыя не поддаются непосредственному наблюденію и на первый взглядъ кажутся очень простыми.

очень медленно, и быстро подымающійся столбъ горячихъ газовъ. Любой кусокъ твердаго вещества проходитъ черезъ печь въ теченіе приблизительно 12 — 15 часовъ, тогда какъ любая частичка кислорода или азота, вступающая черезъ сопла, проходитъ черезъ печь и удаляется изъ нея въ теченіе, вѣроятно, малой доли минуты.

Желѣзная руда всегда содержитъ, кромѣ окиси желѣза, еще значительное количество кремнеземистыхъ или землистыхъ веществъ, называемыхъ пустою породой, точно такъ же, какъ топливо всегда содержитъ извѣстное количество золы.

Эти вещества, пустая порода и зола, соединяются съ известью и образуютъ расплавленную массу, шлакъ, которая плаваетъ на поверхности расплавленнаго чугуна. Въ нижней части печи дѣлаются два отверстія, изъ которыхъ одно, *A*, рис. 114, дѣлается у самаго дна и служитъ для періодическаго выпуска расплавленнаго чугуна, другое же — немного выше и служитъ для выпуска расплавленнаго шлака. Эти отверстія остаются задѣланными глиной, за исключеніемъ того времени, когда изъ нихъ выпускается чугунъ и шлакъ.

Въ то время какъ твердыя вещества медленно опускаются, быстро поднимающіеся горячіе газы, встрѣчаясь съ ними, отдаютъ имъ свое тепло; вслѣдствіе этого, температура газовъ, которая вблизи соплъ выше 1600° Ц., при выходѣ ихъ изъ печи только около 300°—400° Ц.

Въ отношеніи утилизаціи тепла доменная печь очень выгодна, благодаря тому обстоятельству, что топливо сгораетъ въ непосредственномъ соприкосновеніи съ тѣми твердыми веществами, для нагрѣванія которыхъ оно должно служить, а также потому, что продукты горѣнія хорошо охлаждаются, постепенно встрѣчая на своемъ пути все болѣе холодныя массы твердыхъ веществъ.

303) Главныя функціи доменной печи.—Руда состоитъ изъ окиси желѣза и изъ пустой породы. Доменная печь должна служить:

1) для возстановленія желѣза,

2) для науглероживанія его,

3) для его плавленія,

4) для превращенія пустой породы въ плавкій шлакъ и для плавленія этого шлака,

5) для полученія расплавленнаго чугуна и шлака въ видѣ двухъ отдѣльныхъ массъ.

Науглероживаніе желѣза играетъ существеннѣйшую роль, ибо основною чертою этого процесса является то, что всѣ продукты должны получаться въ расплавленномъ состояніи, желѣзо же при этихъ условіяхъ нельзя расплавить, если оно не науглерожено. Кромѣ того, если бы и удавалось его расплавить, оно не было бы достаточно перегрѣто выше точки плавленія для отливки въ свинки или для подачи въ расплавленномъ состояніи для дальнѣйшей переработки.

Составъ пустой породы бываетъ очень различенъ, но только въ рѣдкихъ случаяхъ она содержитъ вещества, нужныя для доменнаго процесса. То же самое можно сказать и относительно золы, образующейся при горѣніи топлива и идущей также на образованіе шлака.

Пояснимъ, что здѣсь разумѣется подъ веществами, нужными для доменнаго процесса. Для того, чтобы процессъ шелъ надлежащимъ образомъ, шлакъ долженъ обладать извѣстными химическими и физическими свойствами. Шлакъ долженъ обладать требуемой плавкостью, долженъ быть богатъ известью и долженъ быть достаточно жидокъ, чтобы вытекать изъ сравнительно узкаго отверстія, служащаго для его выпуска. Такимъ образомъ, шлакъ долженъ обладать извѣстнымъ составомъ, который обусловливалъ бы вышеуказанныя свойства. Очень рѣдко случается, чтобы тѣ вещества, изъ которыхъ образуется шлакъ, т. е. пустая порода и зола, имѣли требуемый составъ. Взятыя вмѣстѣ, они обыкновенно содержатъ меньше извести, чѣмъ нужно. Этотъ недостатокъ возмѣщаютъ, прибавляя извѣстное, заранѣе точно опредѣленное, количество извести ($CaCO_3$). Вещество, прибавляемое для приданія шлаку надлежащаго состава, называется «флюсомъ».

Пустая порода, зола и флюсъ плавятся и образуютъ шлакъ, расплавленный силикатъ, въ составъ котораго входятъ известь и болѣе или менѣе окиси магнія и окиси алюминія. Причиной, почему эти вещества выдѣляются въ видѣ шлака, служитъ то обстоятельство, что они являются единственными тѣлами, которыя окислены въ этой области плавленія. При плавленіи всѣ окисленныя тѣла соединяются въ общую массу, шлакъ, отъ котораго расплавленное желѣзо, будучи неокислено, отдѣ-

ляется, какъ масло отъ воды. Съ расплавленнымъ желѣзомъ соединяются всѣ присутствующія неокисленныя тѣла. Такъ, оно поглощаетъ возстановленные и приведенные въ состояніе металла или металлоида марганецъ, фосфоръ и кремній. Кромѣ того, оно поглощаетъ также извѣстное количество углерода, содержащагося въ топливѣ, приходя съ нимъ въ соприкосновеніе на пути отъ уровня плавленія къ горну, гдѣ оно собирается въ видѣ расплавленной массы. Повидимому, желѣзо способно растворять только ограниченное количество углерода. По крайней мѣрѣ, насколько можно судить, желѣзо поглощаетъ немногимъ болѣе 4 или 5% углерода—количество, достаточное для его насыщенія въ твердомъ состояніи—несмотря на то, что условія поглощенія превосходны, принимая во вниманіе ту большую поверхность соприкосновенія, которая существуетъ между струями расплавленнаго желѣза, когда оно стекаетъ въ нижнюю часть печи, и кусками топлива.

Тотъ фактъ, что шлакъ, происходящій изъ соединенія пустой породы, золы и флюса, образуетъ совершенно отдѣльное отъ расплавленнаго желѣза тѣло, находится въ согласіи съ тѣмъ общимъ положеніемъ, на которомъ основано большинство металлургическихъ процессовъ, а именно, что окисленныя тѣла при плавленіи не сливаются съ неокисленными тѣлами [1]).

---

[1]) Если припомнить знакомые случаи химическаго соединенія, то окажется, что этотъ принципъ имѣетъ широкое примѣненіе. Такъ, съ одной стороны, мы знаемъ, что кислоты соединяются съ окисями; съ другой стороны, металлы соединяются между собой, образуя сплавы, съ ртутью (амальгамы), съ сѣрой (сульфиды), съ фосфоромъ (фосфиды), съ мышьякомъ (арсениды), въ нѣкоторыхъ случаяхъ съ углеродомъ (карбиды) и т. д. Даже металлы, которые, подобно платинѣ, противостоятъ дѣйствію кислотъ, легко соединяются съ металлами и металлоидами. Платина, которая такъ хорошо противостоитъ дѣйствію различныхъ веществъ въ растворѣ, очень легко разрушается при дѣйствіи на нее сухимъ путемъ металловъ и кремнія (подъ вліяніемъ возстановляющаго дѣйствія угля на кремнекислоту), т. е. она легко сплавляется или соединяется съ этими неокисленными веществами.

Само собой разумѣется, не слѣдуетъ смѣшивать этихъ соединеній съ реакціями, идущими мокрымъ путемъ, между самими металлами и окисленными тѣлами, какъ кислоты и высшіе металлическіе окиси. Ибо, вообще говоря, эти реакціи представляютъ собой не прямое соединеніе, а замѣщеніе. Металлъ замѣщаетъ водородъ кислоты, а не соединяется съ нею, какъ съ таковой. Желѣзо не соединяется съ сѣрной кислотой, какъ таковой: оно реагируетъ

На этомъ принципѣ основано большинство отдѣленій, къ которымъ прибѣгаютъ въ металлургіи. Изъ веществъ, которыя требуется отдѣлить другъ отъ друга, нѣкоторыя переводятся въ неокисленное металлическое (или металлоидное) состояніе, другія же остаются въ окисленномъ состояніи. При плавленіи обыкновенно окисленныя тѣла сливаются въ одну массу, неокисленныя въ другую, отдѣльную отъ первой, массу. Подобно водѣ и маслу, эти массы образуютъ два слоя, изъ которыхъ окисленный обыкновенно бываетъ легче и всплываетъ на поверхность въ видѣ шлака.

Конечно, этотъ принципъ не есть общій законъ,—онъ представляетъ собой просто группировку извѣстныхъ важныхъ фактовъ. Очень существенное исключеніе изъ этого принципа можно видѣть на примѣрѣ сѣрнистаго кальція, который, будучи неокисленнымъ тѣломъ, все же не сливается съ расплавленнымъ желѣзомъ, а повидимому растворяется въ шлакѣ. На это будетъ указано въ дальнѣйшемъ изложеніи.

304) Роль топлива.—Изъ вышесказаннаго видно, что роль топлива состоитъ:

1) въ возстановленіи окиси желѣза до металлическаго состоянія;

2) въ науглероживаніи возстановленнаго желѣза и приданіи ему такимъ путемъ большей легкоплавкости;

3) въ нагрѣваніи и расплавленіи какъ желѣза, такъ и веществъ, образующихъ шлакъ.

Для ошлакованія пустой породы и золы, т. е. для образованія изъ нихъ плавкаго соединенія надлежащаго состава, требуется, во-первыхъ, флюсъ, во-вторыхъ, топливо.

съ нею. Съ указанной выше точки зрѣнія, при дѣйствіи кислоты на металлъ, происходитъ соединеніе не металла, а окиси металла. Скорѣе, чѣмъ само желѣзо, въ соединеніе вступаетъ, съ этой точки зрѣнія, окись желѣза и даетъ сѣрнокислое желѣзо. Такимъ путемъ, конечно, многіе окисленныя тѣла могутъ вступать въ взаимодѣйствіе съ неокисленными, результатомъ чего является соединеніе. Но мы можемъ разсматривать это соединеніе, какъ соединеніе между нѣкоторыми продуктами реакціи. Вообще говоря, продукты, которые такимъ образомъ соединяются, или всѣ окислены, или всѣ не окислены. Но въ томъ случаѣ, когда въ взаимодѣйствіе вступаютъ окисленныя тѣла (кислоты и металлическіе окислы и т. п.), обычно происходитъ непосредственное соединеніе, и замѣщеніе вовсе не играетъ существенной роли. То же самое можно сказать и относительно взаимодѣйствія между неокисленными тѣлами (расплавленные металлы, металлы и сѣра, металлы и углеродъ).

305) Химическіе реакціи въ доменной печи. Возстановленіе желѣза.—Вскорѣ послѣ засыпки въ печь, руда нагрѣвается и на нее начинаетъ дѣйствовать окись углерода, при чемъ происходитъ возстановленіе по реакціи

[18] . . . . $Fe_2O_3 + 3\,CO = 2\,Fe + 3\,CO_2$.

Но окись углерода—слабый возстановитель. Такъ, полированный клинокъ ножа, помѣщенный при красномъ каленіи въ атмосферу окиси углерода, слегка покрывается синей побѣжалостью, т. е. окись углерода окисляетъ его съ поверхности. Разумѣется, что газъ, который способенъ окислять желѣзо, не въ состояніи вполнѣ возстановить окись желѣза. Дѣйствительно, возстановленіе желѣза въ верхней части печи происходитъ не до конца; оно идетъ только до тѣхъ поръ, пока не будетъ, или почти не будетъ, достигнуто равновѣсіе между четырьмя веществами, 1) окисью желѣза, 2) образующимся желѣзомъ, 3) окисью углерода и 4) образующейся углекислотой (по реакціи [18]).

Условія равновѣсія несомнѣнно измѣняются въ зависимости отъ температуры, но они никогда не отвѣчаютъ полному возстановленію. По мѣрѣ дальнѣйшаго опусканія руда встрѣчаетъ на своемъ пути окись углерода все съ меньшимъ содержаніемъ углекислоты, происходящей вслѣдствіе вышеуказанной реакціи. Такимъ образомъ, по мѣрѣ того, какъ руда опускается, условіе равновѣсія постепенно измѣняется въ сторону болѣе полнаго возстановленія. Тѣмъ не менѣе, на извѣстномъ, часто небольшомъ разстояніи отъ верхней части печи, возстановленіе почти останавливается. Съ другой стороны, по мѣрѣ приближенія къ колошнику, поднимающіеся газы приходятъ въ соприкосновеніе съ слоями все менѣе и менѣе возстановленной руды. Благодаря этому окисленіе окиси углерода идетъ все далѣе и далѣе. Другими словами, отношеніе

[28] . . . . $\frac{CO_2}{CO} = M$

постепенно увеличивается по мѣрѣ приближенія газовъ къ верхней части печи.

Чѣмъ полнѣе утилизируется топливо при возстановленіи, тѣмъ больше это отношеніе. Оно служитъ мѣрою утилизаціи топлива въ доменной печи.

306) Управленіе работой доменной печи.—При разсмотрѣніи этого вопроса остановимся болѣе тщательно только на тѣхъ соображеніяхъ, которыми должно руководиться лицо, управляющее ходомъ доменной печи. Разумѣется, конечная цѣль завѣдующаго печью заключается въ томъ, чтобы извлечь наибольшую выгоду для предпринимателей. Для этого ему приходится прибѣгать ко многимъ административнымъ мѣрамъ, которыя не входятъ въ рамки настоящаго труда. Техническія же мѣры заключаются въ возможномъ увеличеніи производительности печи, въ тщательномъ регулированіи состава чугуна, въ употребленіи возможно меньшаго количества кокса и т. д. и т. д.

Въ дальнѣйшемъ мы займемся главнымъ образомъ вопросомъ о вліяніи на составъ чугуна и, въ частности, на процентное содержаніе въ немъ кремнія и сѣры нѣкоторыхъ условій, измѣненіе которыхъ зависитъ отъ завѣдующаго печью.

307) Важное значеніе реакцій возстановленія. — Легко видѣть, какое большое значеніе имѣютъ реакціи возстановленія. Этотъ вопросъ можно разсматривать съ различныхъ точекъ зрѣнія.

Во-первыхъ, само собой очевидно, насколько важно, чтобы возстановленіе желѣза изъ руды происходило какъ можно полнѣе, такъ какъ невозстановленное желѣзо должно оставаться въ шлакѣ и вслѣдствіе этого теряться; какъ извѣстно, не существуетъ легкаго способа добыть желѣзо изъ шлака по выпускѣ послѣдняго изъ домны. Но, помимо полученія желѣза, полное возстановленіе важно еще по другой причинѣ. Внутренняя облицовка доменной печи дѣлается изъ огнеупорнаго кирпича, состоящаго главнымъ образомъ изъ силиката окиси алюминія. Этотъ кирпичъ въ скоромъ времени покрывается мелкораздробленнымъ углемъ вслѣдствіе реакціи

[29] . . . . $2\,CO = C + CO_2$.

По всей вѣроятности, если бы не этотъ уголь, кирпичъ подъ вліяніемъ шлака разрушался бы очень скоро. Несодержащій окиси желѣза шлакъ сравнительно мало вліяетъ на огнеупорный кирпичъ, по крайней мѣрѣ на кирпичъ, пропитанный углемъ и охлаждаемый съ внѣшней стороны, какъ это теперь всегда дѣлается въ нижней части печи. Но при значительномъ содержаніи окиси желѣза въ шлакѣ (а это необходимо, если возста-

новленіе желѣза не полно), происходитъ окисленіе и удаленіе угля, отложившагося на кирпичъ, согласно реакціи

[19] . . . . $FeO + C = CO + Fe.$

Вслѣдствіе этого кирпичъ остается незащищеннымъ отъ дѣйствія шлака. Послѣдній очень быстро разъѣдаетъ кирпичъ, по той простой причинѣ, что окись желѣза образуетъ очень легкоплавкое соединеніе съ кремнекислотой и окисью алюминія. Благодаря этому, если возстановленіе въ печи идетъ недостаточно полно и значительное количество окиси желѣза переходитъ въ шлакъ, придавая ему черный цвѣтъ, свойственный силикатамъ закиси желѣза, происходитъ, дѣйствительно, быстрое разъѣданіе кирпичной кладки стѣнокъ.

Далѣе, чрезвычайно важно то обстоятельство, что, регулируя интенсивность возстановленія, можно регулировать химическій составъ чугуна. Вообще, чѣмъ сильнѣе возстановленіе, тѣмъ больше будетъ содержаніе кремнія въ чугунѣ и тѣмъ меньше содержаніе сѣры. Чѣмъ энергичнѣе ведется возстановленіе, тѣмъ полнѣе будетъ возстановленіе фосфора и марганца, содержащихся въ рудѣ, и тѣмъ большее количество этихъ элементовъ будетъ переходить въ чугунъ. Фосфоръ и марганецъ содержатся въ рудѣ главнымъ образомъ въ видѣ фосфорной кислоты, P_2O_5, и перекиси марганца, MnO_2. Возстановленіе ихъ идетъ слѣдующимъ образомъ:

[16] . . . . $P_2O_5 + 5C = 5CO + 2P$ и
[17] . . . . $MnO_2 + 2C = 2CO + Mn$

Намъ нѣтъ нужды, однако, разсматривать вліяніе, оказываемое измѣненіями условій возстановленія на содержаніе марганца и фосфора, по той причинѣ, что въ большинствѣ случаевъ содержаніе марганца и фосфора въ чугунѣ регулируютъ, измѣняя ихъ содержаніе въ рудѣ, а не при помощи варьированія условій работы печи. Я не касаюсь здѣсь изготовленія зеркальнаго чугуна, ферро-марганца и другихъ спеціальныхъ сортовъ чугуна, и ограничиваюсь только обычными классами чугуна, содержаніе марганца въ которыхъ не особенно велико.

Что касается до содержанія сѣры и кремнія въ чугунѣ, то регулированіе его уже въ сильной степени зависитъ отъ того, какъ ведется выплавка. Только незначительная часть кремнія,

содержащагося въ рудѣ въ видѣ кремнекислоты, переходитъ въ чугунъ. Несмотря однако на это, измѣненія въ содержаніи кремнія оказываютъ глубокое вліяніе на свойства чугуна. Эти измѣненія вполнѣ поддаются контролю, такъ что изъ одной и той же смѣси можно приготовить чугунъ почти не содержащій кремнія или чугунъ съ большимъ содержаніемъ кремнія.

Точно также, вовсе не вся сѣра, содержащаяся въ рудѣ или топливѣ, переходитъ въ чугунъ, при чемъ, понятно, что чѣмъ меньше ея переходитъ, тѣмъ лучше. Измѣняя условія работы доменной печи, можно въ сильной степени регулировать процентъ сѣры, переходящей въ чугунъ. Содержаніе кремнія въ чугунѣ регулируютъ, регулируя возстановленіе кремнекислоты, содержащейся въ пустой породѣ и золѣ. Возстановленіе идетъ согласно реакціи

[15] . . . . $Si\,O_2 + 2\,C = Si + 2\,CO$

Возстановленный кремній тотчасъ поглощается расплавленнымъ желѣзомъ. Надо сказать, что эта реакція съ трудомъ идетъ въ отсутствія желѣза. Но если присутствуетъ желѣзо и поглощаетъ образующійся кремній, она протекаетъ легко. Такимъ образомъ, регулируя условія возстановленія, можно регулировать ходъ реакціи (15), а слѣдовательно и содержаніе кремнія въ чугунѣ.

Мы уже видѣли (§ 190), что присутствіе кремнія способствуетъ выдѣленію углерода въ видѣ графита и ведетъ къ образованію сѣраго чугуна. Короче говоря, присутствіе кремнія въ извѣстномъ количествѣ желательно, но только въ извѣстномъ количествѣ. Для процессовъ переработки чугуна на сталь, количество кремнія въ чугунѣ играетъ чрезвычайно важную роль. Въ силу этихъ причинъ необходимо регулировать содержаніе кремнія въ чугунѣ, или, другими словами, регулировать ходъ возстановительнаго процесса, потому что послѣдній обусловливаетъ количество кремнія, которое должно возстановиться и войти въ составъ чугуна.

Для регулированія содержанія сѣры въ чугунѣ прибѣгаютъ къ тѣмъ же общимъ мѣрамъ, хотя онѣ въ данномъ случаѣ основываются на совершенно иномъ принципѣ. Мнѣнія по этому вопросу расходятся, однако мы можемъ принять въ качествѣ

рабочей гипотезы, что содержаніе сѣры въ чугунѣ зависитъ отъ той степени, до которой протекаетъ слѣдующая реакція

[30] . . . . . $FeS + CaO + C = Fe + CaS + CO.$

Очевидно, что эта реакція представляетъ собою реакцію возстановленія. При этомъ происходитъ, однако, не возстановленіе сѣры, а кальція, и вмѣсто сѣрнистаго желѣза получается сѣрнистый кальцій. Изложимъ въ краткихъ чертахъ, какимъ образомъ эта реакція способствуетъ уменьшенію содержанія сѣры въ чугунѣ.

Сѣра заключается въ рудѣ въ видѣ сѣрнистаго желѣза, въ большинствѣ случаевъ въ видѣ пирита, FeS_2. Подъ вліяніемъ нагрѣванія половина сѣры изъ пирита почти, или даже совсѣмъ, удаляется, другая же половина остается очень прочно связанной съ желѣзомъ въ видѣ FeS. Повидимому, существуетъ общее положеніе такого рода, что металлы способны растворять въ небольшомъ, а иногда даже и въ большомъ количествѣ свои окиси и сѣрнистыя соединенія, по отношенію же къ окисямъ и сѣрнистымъ соединеніямъ другихъ металловъ они обладаютъ гораздо меньшей способностью къ растворенію. Согласно этому, сѣра, оставаясь въ состояніи сѣрнистаго желѣза, должна была бы растворяться въ чугунѣ и сильно понижать его качества. Этого можно избѣжать при помощи реакціи (30), т. е. заставивъ сѣру соединиться съ кальціемъ и образовать сѣрнистый кальцій, который не растворяется въ желѣзѣ, а переходитъ въ шлакъ. Содержаніе сѣры въ чугунѣ будетъ тѣмъ меньше, чѣмъ дальше идетъ возстановленіе кальція, т. е. вообще, чѣмъ энергичнѣе ведется возстановленіе.

Я вполнѣ сознаю, что эта теорія неспособна объяснить всѣ явленія, но, за неимѣніемъ лучшей, привожу ее здѣсь, такъ какъ она все же объясняетъ многія изъ нихъ и вполнѣ логична. Мнѣ кажется вѣроятнымъ, что тѣ явленія, которыя не могутъ быть объяснены съ точки зрѣнія данной теоріи, зависятъ отъ какого-то добавочнаго фактора, но что принципъ, на которомъ она основывается, вѣренъ.

Здѣсь мы замѣчаемъ слѣдующее различіе. Процентное содержаніе кремнія, марганца и фосфора въ чугунѣ будетъ тѣмъ больше, чѣмъ энергичнѣе возстановленіе; процентное же содержаніе сѣры въ чугунѣ, наоборотъ, чѣмъ энергичнѣе возстано-

вленіе, тѣмъ будетъ меньше. При возстановленіи кремній, марганецъ и фосфоръ переходятъ изъ шлака въ металлъ, при возстановленіи же кальція сѣра переходитъ въ шлакъ, а не въ металлъ.

Вліяніе сѣры на выдѣленіе графита, слѣдовательно и на изломъ или зерно чугуна, противоположно вліянію кремнія, а именно сѣра препятствуетъ выдѣленію графита и способствуетъ образованію бѣлаго, а не сѣраго чугуна. Такимъ образомъ, вліяніе кремнія и сѣры на образованіе графита при усиленіи возстановленія оказывается одинаковымъ. Другими словами, болѣе энергичное возстановленіе способствуетъ выдѣленію графита и образованію сѣраго чугуна, увеличивая въ немъ содержаніе кремнія и уменьшая содержаніе сѣры.

308) Мѣры, примѣняемыя для регулированія возстановленія. — Мы разсмотримъ слѣдующія мѣры:

1) Контроль надъ температурой горна печи.

2) Измѣненіе количества топлива по отношенію къ «шихтѣ», т. е. къ рудѣ и известняку.

3) Измѣненіе состава шлака.

Таблица 19 представляетъ собою сводку въ сжатомъ видѣ тѣхъ результатовъ, къ которымъ насъ приведетъ въ дальнѣйшемъ разсмотрѣніе этого предмета. Мы разсмотримъ вліяніе, которое оказываютъ на содержаніе кремнія и сѣры въ чугунѣ измѣненія въ количествѣ топлива по отношенію къ шихтѣ, въ температурѣ дутья и въ составѣ шлака. Нѣкоторыя изъ этихъ измѣненій оказываютъ двоякое вліяніе—термическое и непосредственное химическое. Напримѣръ, коксъ служитъ какъ для нагрѣванія, такъ и для возстановленія. Увеличивъ пропорцію кокса, мы одновременно повысимъ температуру, что̀ уже само по себѣ способствуетъ возстановленію, и усилимъ возстановленіе тѣмъ, что введемъ въ дѣйствіе большее количество возстановителя. Первое можно назвать термическимъ вліяніемъ, второе—непосредственнымъ химическимъ вліяніемъ. Въ табхицѣ 19 термическія вліянія представлены въ столбцахъ 2, 3 и 4, химическія вліянія—въ столбцахъ 5 и 6.

Столбецъ 2 указываетъ на вліяніе, оказываемое измѣненіями, приведенными въ столбцѣ 1, на температуру горна, столбцы же 3 и 4 указываютъ на вліяніе, оказываемое измѣненіемъ температуры горна на содержаніе кремнія и сѣры въ чугунѣ. Мы

Таблица 19.

Ряды.	ИЗМѢНЕНІЯ.	Вліяніе на чугунъ.									
		Вліяніе на содержаніе кремнія и сѣры.							Вліяніе, оказываемое на содержаніе графита		
		Термическое вліяніе.			Непосредственное химическое вліяніе.		Результатъ 3, 4, 5 и 6.				
		На температуру горна.	На содержаніе кремнія.	На содержаніе сѣры.	На содержаніе кремнія.	На содержаніе сѣры.	На содержаніе кремнія.	На содержаніе сѣры.	Кремніемъ.	Сѣрой.	Вообщемъ.
	Столбецъ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	Увеличеніе пропорціи топлива.	+	+	—	+	—	+	—	+	+	+
B	Повышеніе температуры дутья.	+	+	—			+	—	+	+	+
C	Увеличеніе содержанія окиси кальція и окиси магнія въ плакѣ = повышеніе его точки плавленія.	+	+	—	—	—	±	—	±	+	±

будемъ отмѣчать въ этой таблицѣ знаками плюсъ (+) и минусъ (—) тѣ результаты, къ которымъ будемъ приходить при дальнѣйшемъ разсмотрѣніи этого вопроса.

Такъ, напр., тотъ фактъ, что съ увеличеніемъ пропорціи кокса температура горна повышается, мы обозначаемъ знакомъ плюсъ (+) въ столбцѣ 2, въ ряду *A*. Увеличеніе содержанія кремнія въ чугунѣ по мѣрѣ повышенія температуры горна мы отмѣчаемъ знакомъ плюсъ (+) въ столбцѣ 3, въ ряду *A*, и т. д.

Столбецъ 9 указываетъ на то, какое вліяніе оказываетъ измѣненіе въ содержаніи кремнія (столбецъ 7) на выдѣленіе графита въ чугунѣ; столбецъ 10 указываетъ на соотвѣтствующее вліяніе, оказываемое измѣненіемъ въ содержаніи сѣры (столбецъ 8). Столбецъ 11 даетъ результатъ вліяній, указанныхъ въ столбцахъ 9 и 10.

309) Температура горна.—Температура горна, т. е. нижней части доменной печи, оказываетъ чрезвычайно сильное вліяніе на ходъ возстановленія. Дѣло въ томъ, что въ горнѣ заканчивается возстановленіе, или, иными словами, здѣсь опредѣляется та степень, до которой оно доходитъ. Чѣмъ выше температура, тѣмъ сильнѣе возстановительное дѣйствіе угля на желѣзо, кремній, кальцій, марганецъ, фосфоръ и, вѣроятно, на большинство другихъ элементовъ. Поэтому, чѣмъ выше температура горна, тѣмъ энергичнѣе пойдетъ возстановленіе подъ вліяніемъ топлива, тѣмъ больше кремнія возстановится и перейдетъ въ желѣзо и тѣмъ больше возстановится кальція, который переведетъ сѣру изъ желѣза въ шлакъ.

Однимъ словомъ, все, что повышаетъ температуру горна, тѣмъ самымъ увеличиваетъ содержаніе кремнія въ чугунѣ и уменьшаетъ содержаніе въ немъ сѣры. Къ этому положенію намъ въ дальнѣйшемъ еще не разъ придется обращаться.

Для повышенія температуры горна существуютъ три главныхъ способа:

1) Увеличеніе количества топлива по отношенію къ рудѣ и флюсу.

2) Повышеніе температуры дутья.

3) Повышеніе точки плавленія шлака.

Первые два способа вполнѣ понятны и не требуютъ какихъ либо поясненій. Поэтому въ таблицѣ 19 мы принимаемъ знаки плюсъ (+) въ столбцѣ 1, въ рядахъ *A* и *B*. Далѣе, такъ какъ повышеніе температуры способствуетъ возстановленію и тѣмъ самымъ вызываетъ увеличеніе содержанія кремнія и уменьшеніе содержанія сѣры въ чугунѣ, мы можемъ принять знаки плюсъ въ столбцѣ 3 и знаки минусъ въ столбцѣ 4, въ рядахъ *A* и *B*. Само собой разумѣется, что увеличеніе пропорціи кокса должно оказывать непосредственное химическое вліяніе и усиливать интенсивность возстановленія, такъ какъ топливо играетъ роль возстановителя. А такъ какъ повышеніе интенсивности

возстановленія должно увеличивать содержаніе кремнія и уменьшать содержаніе сѣры въ чугунѣ, то мы и принимаемъ знакъ минусъ соотвѣтственно въ столбцахъ 5 и 6, въ ряду *A*.

Изъ знаковъ въ столбцахъ 3, 4, 5 и 6 въ ряду *A* непосредственно слѣдуютъ знаки въ столбцахъ 7 — 11 въ томъ же ряду.

Итакъ, по всестороннемъ обсужденіи мы приходимъ къ заключенію, что увеличеніе пропорціи кокса должно всегда способствовать выдѣленію графита въ чугунѣ, т. е. полученію болѣе сѣраго чугуна.

Мы можемъ принять, что повышеніе температуры дутья не оказываетъ прямого химическаго вліянія, а только вліяніе термическое. Поэтому оставимъ незаполненными мѣста въ столбцахъ 5 и 6, въ ряду *B*. Знаки же въ столбцахъ 7—11, въ ряду *B*, непосредственно слѣдуютъ изъ знаковъ въ столбцахъ 2—4, въ томъ же ряду.

310) Вліяніе точки плавленія шлака на температуру горна.—Необходимо въ краткихъ чертахъ пояснить, почему повышеніе точки плавленія шлака влечетъ за собой повышеніе температуры горна.

Положимъ, что въ правую часть данной доменной печи мы будемъ загружать смѣсь, въ составъ которой будутъ входить образующія шлакъ вещества съ очень высокой температурой плавленія, въ лѣвую же часть смѣсь, въ которой будутъ содержаться относительно легкоплавкія вещества, образующія шлакъ. Далѣе положимъ, что та и другая смѣсь будутъ опускаться, не смѣшиваясь. Разумѣется, въ дѣйствительности такое положеніе дѣла не представляется возможнымъ. Данное количество руды, флюса и топлива, загруженное съ лѣвой стороны, постепенно опускается, нагрѣвается все больше и больше и, наконецъ, на уровнѣ *A*, рис. 89, достигаетъ такой температуры, что пустая порода, зола и известь вступаютъ между собой въ реакцію, соединяются, т. е. образуютъ шлакъ, плавятся и стекаютъ на дно печи.

Загруженные съ правой стороны руда, флюсъ и шлакъ точно также опускаются и нагрѣваются. Но по достиженіи точки *A*, при которой началось плавленіе смѣси, загруженной съ лѣвой стороны, не происходитъ плавленія смѣси, загруженной съ правой стороны, потому что образующія шлакъ веще-

ства, входящія въ составъ послѣдней, гораздо болѣе тугоплавки. Взаимодѣйствіе между ними становится возможнымъ, и они начинаютъ плавиться при значительно болѣе высокой температурѣ, т. е. когда они опустятся гораздо ниже, положимъ, до уровня *C*. Образовавшійся шлакъ, какъ и въ предыдущемъ случаѣ, стекаетъ на дно печи.

Твердые матеріалы опускаются въ печи очень медленно и вполнѣ успѣваютъ улавливать тепло подымающихся газовъ и окружающаго ихъ топлива. Короче говоря, они успѣваютъ принять температуру, соотвѣтствующую тому уровню печи, на которомъ они находятся. Но тотчасъ по переходѣ изъ твердаго въ жидкое состояніе они стекаютъ на дно печи (см. рис. 114), при чемъ это происходитъ настолько быстро, что они почти не успѣваютъ болѣе нагрѣться. Слѣдовательно, температура какъ болѣе легкоплавкаго, такъ и болѣе тугоплавкаго шлака, по достиженіи дна печи, будетъ немного выше ихъ соотвѣтствующихъ точекъ плавленія. Безъ сомнѣнія, и тотъ и другой шлакъ при стеканіи послѣ плавленія нагрѣваются нѣсколько выше точки плавленія. Однако это не можетъ возмѣстить разницы въ ихъ точкахъ плавленія.

Для большей ясности разберемъ предѣльный случай. Положимъ, что вмѣстѣ съ топливомъ въ одну изъ печей мы загрузимъ замерзшую ртуть, въ другую желѣзо, охлажденное до одинаковой съ ртутью температуры. Допустимъ при этомъ, что ртуть не летуча. Ртуть опустится самое большее на нѣсколько футовъ, расплавится и тотчасъ съ большой скоростью сбѣжитъ на дно печи. Желѣзо же будетъ медленно опускаться въ печи и расплавится, только достигнувъ уровня, гдѣ температура 1600°Ц., — температура, соотвѣтствующая точкѣ плавленія желѣза. Какъ расплавленная ртуть, такъ и расплавленное желѣзо при стеканіи нагрѣются слегка выше точки плавленія, при чемъ, конечно, ртуть нагрѣется на большее число градусовъ выше своей точки плавленія, чѣмъ желѣзо, такъ какъ она должна пройти большее разстояніе, чтобы достигнуть дна печи, чѣмъ послѣднее. Тѣмъ не менѣе разница между температурами, при которыхъ ртуть и желѣзо достигнутъ дна печи, должна остаться огромной, потому что ртуть плавится и начинаетъ стекать при — 40°Ц., желѣзо же только при 1600°Ц. Я останавливаюсь на этомъ принципѣ потому, что онъ лежитъ въ основѣ всѣхъ процессовъ выплавки въ шахтенныхъ печахъ.

Вторая, менѣе важная, причина того, что повышеніе температуры плавленія шлака вызываетъ повышеніе температуры горна, заключается въ томъ, что чѣмъ труднѣе плавится шлакъ, тѣмъ въ видѣ болѣе толстого слоя онъ прилипаетъ къ стѣнкамъ нижней части печи, и тѣмъ меньше черезъ нихъ теряется тепла наружу.

По указаннымъ выше двумъ причинамъ повышеніе температуры плавленія шлака ведетъ къ повышенію температуры доменнаго процесса, а слѣдовательно и къ болѣе полному возстановленію.

Повышеніе температуры плавленія шлака способствуетъ болѣе полному возстановленію еще и потому, что при этомъ окиси металловъ, кремнекислота, фосфорная кислота и т. д. подвергаются въ теченіе болѣе долгаго времени и при болѣе высокой температурѣ возстановительному дѣйствію печи. Кромѣ того, кремнекислота, известь, окись желѣза и т. д. легче возстановляются въ свободномъ состояніи, т. е. когда они не находятся въ химическомъ соединеніи между собой или съ другими веществами, потому что для того, чтобы произошло возстановленіе, необходимо нарушеніе связи, удерживающей ихъ въ состояніи соединенія. Другими словами, связь между двумя веществами находящимися въ соединеніи, служитъ препятствіемъ для ихъ возстановленія. Кремнекислота, известь и т. д., а также та окись желѣза, которая не успѣла возстановиться, входятъ между собой въ соединеніе, когда начинается плавленіе, или по крайней мѣрѣ очень незадолго до того. Отсюда слѣдуетъ, что, при прочихъ равныхъ условіяхъ, возстановленіе идетъ легче до плавленія, чѣмъ послѣ.

Очевидно, что чѣмъ бѣднѣе руда, т. е. чѣмъ больше она содержитъ пустой породы, тѣмъ большую роль будетъ играть только что указанное обстоятельство. Въ особенности съ этимъ приходится считаться при выплавкѣ мѣдныхъ рудъ, которыя очень бѣдны, т. е. содержатъ чрезвычайно большое количество пустой породы.

311) Регулированіе точки плавленія доменнаго шлака при помощи измѣненія его состава.—Обратимся теперь къ вопросу, какимъ образомъ можно измѣнять составъ шлака, а слѣдовательно и его температуру плавленія. Отъ послѣдней же зависитъ температура горна и въ конечномъ результатѣ содержаніе кремнія и сѣры въ чугунѣ.

Доменные шлаки представляютъ собою силикаты окиси кальція, окиси магнія и окиси алюминія. Во многихъ случаяхъ бываетъ выгодно съ большою тщательностью опредѣлить, сколько окиси алюминія долженъ содержать шлакъ. Но это уже не входитъ въ задачу настоящаго изслѣдованія. Обычно для регулированія работы печи прибѣгаютъ къ измѣненію пропорціи между засыпаемыми известью и рудой. Для упрощенія, мы будемъ

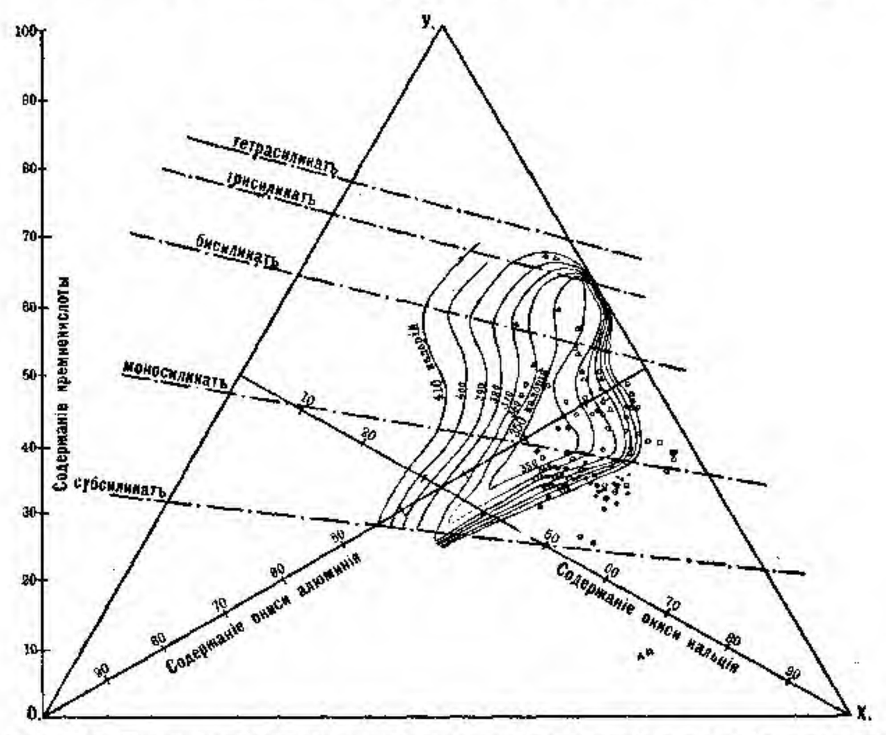


Рис. 115. Теплота плавленія силикатовъ окиси алюминія и кальція, и составъ нѣкоторыхъ доменныхъ шлаковъ.

Обозначенія:

∧ = Шлаки доменныхъ печей, работающихъ на древесномъ углѣ. Шлаки доменныхъ печей, работающихъ на коксѣ. Шлаки обозначены кружками.
ϴ = при содержаніи кремнія въ чугунѣ 1,75% или болѣе.
● = при содержаніи кремнія въ чугунѣ между 1% и 1,75%.
○ = при бѣломъ чугунѣ или содержаніи кремнія въ чугунѣ менѣе 1%.

принимать, что известь и магнезія въ данномъ случаѣ эквивалентны. Такимъ образомъ, вопросъ, который намъ надлежитъ разрѣшить, состоитъ въ томъ, какимъ образомъ измѣненія въ содержаніи окиси кальція вліяютъ на точку плавленія шлака.

Обращаясь къ рис. 115, можно видѣть, что въ большинствѣ случаевъ доменные шлаки содержатъ больше окиси маг-

нія и окиси кальція, чѣмъ наиболѣе легкоплавкій силикатъ, въ составъ котораго входятъ окиси магнія, кальція и алюминія.

Это объясняется тѣмъ, что при большомъ содержаніи окиси кальція въ шлакѣ легче происходитъ удаленіе сѣры изъ желѣза. Для примѣра представимъ себѣ, что въ одномъ случаѣ составъ шлака $CaOSiO_2$, въ другомъ $2\,CaOSiO_2$. Очевидно, что во второмъ случаѣ возстановленіе кальція пойдетъ легче, чѣмъ въ первомъ, по реакціи

[30] . . . . . . $FeS + CaO + C = CaS + CO + Fe.$

Это находится въ согласіи съ тѣмъ общимъ положеніемъ, что данный элементъ или окись, въ настоящемъ случаѣ окись кальція, не такъ прочно удерживаются, когда они входятъ въ составъ химическаго соединенія, если можно такъ выразиться, въ избыткѣ. Высшіе окислы, напр. перекись водорода, вообще говоря, легко отдаютъ часть кислорода. Окись желѣза, Fe_2O_3, и окись мѣди, CuO, при нагрѣваніи легко отдаютъ кислородъ и переходятъ въ магнитную окись, Fe_3O_4, и въ закись мѣди, Cu_2O. Точно также, при нагрѣваніи углекислота CO_2 легко распадается на окись углерода и кислородъ. Окись кальція, находясь въ избыткѣ въ шлакѣ, слабо удерживается кремнекислотой и по этой причинѣ легко возстановляется (реакція [30]).

Кремнекислота и окись кальція въ шлакѣ химически связаны между собой, и эта связь препятствуетъ удаленію кремнія и кальція путемъ возстановленія. Но если есть избытокъ окиси кальція, то этотъ избытокъ не такъ прочно связанъ съ кремнекислотой, и кальцій сравнительно легко возстановляется. Такимъ образомъ, чѣмъ богаче шлакъ окисью кальція, тѣмъ легче происходитъ возстановленіе кальція.

Наоборотъ, если шлакъ содержитъ мало окиси кальція, или, иными словами, если онъ содержитъ избытокъ кремнекислоты, тогда въ силу тѣхъ же причинъ легче идетъ возстановленіе кремнія.

Въ силу всѣхъ вышеизложенныхъ причинъ обыкновенно стремятся къ тому, чтобы шлакъ содержалъ большое количество окиси кальція. Но, конечно, если сѣра присутствуетъ въ небольшомъ количествѣ, или если вслѣдствіе какихъ либо соображеній не стремятся къ удаленію ея изъ желѣза, тогда нѣтъ нужды, чтобы шлакъ былъ богатъ окисью кальція. Такъ шлакъ

доменныхъ печей, работающихъ на древесномъ углѣ, часто содержитъ мало окиси кальція по той причинѣ, что древесный уголь свободенъ отъ сѣры, всегда содержащейся въ коксѣ и антрацитѣ. При работѣ на древесномъ углѣ нѣтъ надобности прибѣгать къ обезсѣриванію, если только сѣра не вносится вмѣстѣ съ рудой или известью.

Какъ уже было указано, съ увеличеніемъ содержанія окиси кальція въ шлакѣ повышается его точка плавленія и наоборотъ. На этомъ основана рубрика *C* столбца 1 въ таблицѣ 19.

Установивъ, что увеличеніе содержанія окиси кальція въ шлакѣ или, другими словами, увеличеніе количества засыпаемой въ доменную печь извести ведетъ къ повышенію температуры горна, отмѣтимъ этотъ фактъ знакомъ плюсъ въ ряду *C*, въ столбцѣ 2; а такъ какъ повышеніе температуры горна должно, въ силу вышеуказанныхъ причинъ, вести къ увеличенію содержанія сѣры въ чугунѣ, то мы и принимаемъ соотвѣтственно знаки плюсъ и минусъ въ столбцахъ 3 и 4, въ ряду *C*.

312) Непосредственное химическое дѣйствіе, оказываемое окисью кальція, содержащейся въ шлакѣ.—Мы видѣли, что, увеличивая содержаніе окиси кальція въ шлакѣ, мы тѣмъ самымъ повышаемъ его точку плавленія, а слѣдовательно повышаемъ температуру горна, усиливаемъ возстановленіе и, благодаря этому, увеличиваемъ содержаніе сѣры въ чугунѣ. Короче говоря, мы видѣли, какъ измѣненіе въ содержаніи окиси кальція вліяетъ термически; теперь же намъ предстоитъ разобраться, какъ такое измѣненіе будетъ вліять чисто химически.

По только что указанной причинѣ, увеличеніе содержанія окиси кальція въ шлакѣ способствуетъ реакціи [30], т. е. обезсѣриванію желѣза. Поэтому мы можемъ принять знакъ минусъ (—) въ ряду *C*, въ столбцѣ 6 (табл. 19).

Увеличивая содержаніе окиси кальція въ шлакѣ, мы тѣмъ самымъ, относительно, понижаемъ въ немъ содержаніе кремнекислоты. Вслѣдствіе этого у шлака повышается способность удерживать кремнекислоту. Другими словами, въ шлакѣ, содержащемъ мало кремнекислоты и много окиси кальція, кремнекислота удерживается гораздо прочнѣе, чѣмъ въ шлакѣ, богатомъ кремнекислотой. Иначе говоря, повышая процентное содержаніе окиси кальція, мы уменьшаемъ способность шлака удерживать окись кальція и пропорціонально увеличиваемъ его способность

удерживать кремнекислоту, а слѣдовательно задерживаемъ возстановленіе кремнія по реакціи

$$[15] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad SiO_2 + 2\,C = 2\,CO + Si.$$

Однимъ словомъ, повышеніе содержанія окиси кальція въ шлакѣ препятствуетъ возстановленію кремнія и ведетъ къ уменьшенію содержанія его въ чугунѣ, а слѣдовательно и къ образованію менѣе сѣрыхъ сортовъ чугуна. На этомъ основаніи мы принимаемъ знакъ минусъ (—) въ ряду *C*, въ столбцѣ 5.

Разсматривая вмѣстѣ термическое и непосредственное химическое вліянія, оказываемыя измѣненіемъ содержанія окиси кальція въ шлакѣ, мы видимъ, что—поскольку это касается сѣры,—оба эти вліянія направлены въ одну сторону, а именно въ сторону обезсѣриванія чугуна. На основаніи этого мы принимаемъ знакъ минусъ (—) въ ряду *C*, въ столбцѣ 8. Что же касается до кремнія, то термическій эффектъ, обусловливаемый увеличеніемъ содержанія окиси кальція (столбецъ 3), противуположенъ химическому эффекту (столбецъ 5). Поэтому въ ряду *C*, въ столбцѣ 7, мы ставимъ знакъ (±).

Изъ знаковъ въ ряду *C*, въ столбцахъ 2 — 8, непосредственно слѣдуютъ знаки въ столбцахъ 9—11, въ томъ же ряду.

313) Вліяніе, оказываемое измѣненіемъ условій, на содержаніе кремнія, въ большинствѣ случаевъ противуположно вліянію, оказываемому на содержаніе сѣры. — Разсматривая таблицу 19 въ цѣломъ, можно видѣть, что измѣненіе любого условія вліяетъ на содержаніе кремнія обратно, чѣмъ на содержаніе сѣры. Исключеніе составляетъ вліяніе, оказываемое измѣненіемъ содержанія окиси кальція въ шлакѣ на содержаніе сѣры. Другими словами, тѣ измѣненія въ ходѣ работы печи, которыя ведутъ къ уменьшенію содержанія сѣры и къ полученію болѣе сѣраго чугуна, ведутъ одновременно къ уменьшенію содержанія въ немъ кремнія, а слѣдовательно равнымъ образомъ къ полученію болѣе сѣраго чугуна.

Этимъ объясняется трудность полученія чугуна, который содержалъ бы мало какъ сѣры, такъ и кремнія. Выше было указано, что только увеличеніе содержанія окиси кальція въ шлакѣ ведетъ къ пониженію содержанія въ чугунѣ одновременно какъ кремнія, такъ и сѣры.

314) Сравнительная быстрота различныхъ способовъ повышенія температуры горна.— Къ повышенію температуры горна прибѣгаютъ по двумъ соображеніямъ. Во-первыхъ, можетъ встрѣтиться надобность получать постоянно или въ теченіе долгаго промежутка времени чугунъ болѣе сѣрый, чѣмъ тотъ, который обычно выплавлялся. Для этого чугунъ долженъ получаться съ большимъ содержаніемъ кремнія или съ меньшимъ содержаніемъ сѣры, или и то и другое вмѣстѣ.

Во-вторыхъ, можетъ встрѣтиться надобность поднять температуру вслѣдствіе временнаго нарушенія правильной работы печи, вызваннаго, напримѣръ, поврежденіемъ фурмы, или поступленіемъ въ горнъ струи воды черезъ течь въ коробкѣ, служащей для охлажденія стѣнки печи. Въ подобныхъ случаяхъ необходимо принимать мѣры, которыя бы оказывали очень быстрое дѣйствіе. Изъ трехъ разсмотрѣнныхъ нами способовъ, служащихъ для повышенія температуры горна, а именно:

1) повышеніе температуры дутья,

2) увеличеніе пропорціи топлива,

3) повышеніе точки плавленія шлака,—первый оказываетъ дѣйствіе наиболѣе быстро. Топливо, флюсъ и руда загружаются въ печь только сверху, и должно пройти много часовъ прежде, чѣмъ избытокъ топлива или избытокъ извести достигнетъ горна. Повышеніе же температуры дутья тотчасъ повышаетъ температуру горна. Часто, однако, затрудненіе состоитъ въ томъ что какъ разъ въ то время, когда нужно повысить температуру дутья, колошниковые газы, служащіе для его нагрѣванія, оказываются бѣдны окисью углерода, т. е. обладаютъ малымъ тепловымъ эффектомъ. При этомъ малое содержаніе окиси углерода въ колошниковыхъ газахъ обусловливается той же причиной, которая создаетъ необходимость поднять температуру дутья. Поэтому чрезвычайно важно устроить такъ, чтобы паровые котлы можно было топить также и углемъ или другимъ топливомъ, и направлять въ печь, служащую для нагрѣванія дутья, при надобности, большее количество газа.

При увеличеніи пропорціи топлива должно пройти много часовъ прежде, чѣмъ избытокъ его достигнетъ горна печи и повыситъ температуру до желаемой степени.

На самомъ же дѣлѣ этотъ способъ оказываетъ гораздо болѣе быстрое дѣйствіе, чѣмъ можно было бы предполагать. Дѣло

въ томъ, что топливо, загружаемое въ видѣ большихъ угловатыхъ кусковъ, вызываетъ разрыхленіе колоши въ верхней части печи, благодаря чему уменьшается треніе, испытываемое поднимающимися газами, и весь процессъ ускоряется. Въ частности, дутье можетъ поступать въ нижнюю часть печи только съ скоростью, равной той, съ которой газы удаляются изъ верхней части печи, поэтому вышеуказанное дѣйствіе избыточнаго топлива совершенно одинаково съ дѣйствіемъ, которое оказало бы повышеніе давленія дутья. Такимъ образомъ, повышеніе пропорціи топлива даетъ возможность продувать большее количество воздуха въ секунду, а слѣдовательно сжигать большее количество топлива въ секунду и развивать большее количество тепла, въ то время какъ отдача тепла черезъ стѣнки печи въ сущности остается постоянной. Короче говоря, въ секунду развивается большее количество тепла, между тѣмъ отдача тепла черезъ стѣнки соотвѣтственно не увеличивается.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

Металлургическія газовыя печи.

315) Газовое отопленіе и прямое отопленіе.—Въ извѣстномъ смыслѣ можно сказать, что всѣ отражательныя печи являются газовыми печами, потому что онѣ нагрѣваются пламенемъ, пламя же есть горящій газъ.

316) Подъ прямымъ отопленіемъ подразумѣвается такая система отопленія, при которой уголь или другое твердое топливо сгораетъ въ топкѣ, непосредственно примыкающей къ рабочему пространству отражательной печи. При этомъ слой топлива долженъ быть настолько тонокъ, чтобы черезъ наиболѣе широкіе промежутки между отдѣльными кусками проходило достаточно атмосфернаго кислорода для сгоранія какъ окиси углерода, образующейся вслѣдствіе того, что въ нѣкоторыхъ мѣстахъ черезъ узкіе промежутки доступъ воздуха къ топливу недостаточенъ и происходитъ неполное его горѣніе, такъ и отгоняющихся углеводородовъ. Такимъ образомъ, съ поверхности топлива поднимаются одновременно какъ горючій газъ, такъ и воздухъ, служащій для его горѣнія. Пламя возникаетъ у самой поверхности топлива.

317) Подъ газовымъ отопленіемъ разумѣется такая система отопленія, когда топливо образуетъ настолько толстый слой, что почти весь кислородъ воздуха, проходящаго черезъ него, соединяется съ углеродомъ топлива и образуетъ окись углерода. Съ поверхности топлива поднимается разбавленный азотомъ

воздуха горючій газъ, состоящій, главнымъ образомъ, изъ окиси углерода и отгоняющихся углеводородовъ. Для сжиганія этого газа служитъ спеціально для этой цѣли впускаемый воздухъ. Такимъ образомъ, при прямомъ отопленіи съ поверхности топлива поднимается пламя, при газовомъ же отопленіи горючій газъ, который уже затѣмъ только даетъ пламя.

Короче говоря, при прямомъ отопленіи слой топлива настолько тонокъ, что на поверхности его непосредственно возникаетъ пламя; при газовомъ же отопленіи слой топлива настолько толстъ, что возникаетъ только горючій газъ. Въ этомъ и состоитъ существенное отличіе этихъ двухъ системъ отопленія.

318) Газы, примѣняемые въ металлургіи.—Газъ, получаемый только что указаннымъ образомъ, называютъ «генераторнымъ газомъ», въ отличіе отъ природнаго газа, отъ газа, получаемаго сухой перегонкой угля, и отъ «водяного газа», получаемаго пропусканіемъ пара надъ раскаленнымъ топливомъ: Реакція образованія «водяного газа» слѣдующая:

[31]. . . . . $H_2O + C = 2H + CO.$

Въ немногихъ мѣстахъ, подобно Питтсбургу, имѣется природный газъ. Обычно же почти всегда для металлургическихъ процессовъ пользуются генераторнымъ газомъ, съ прибавкою водяного газа, т. е. къ воздуху, служащему для полученія генераторнаго газа, примѣшивается нѣкоторое количество водяного пара (См. § 330). На единицу развиваемаго тепла этотъ газъ при обычныхъ условіяхъ является, вѣроятно, самымъ дешевымъ. Недостатокъ его однако заключается въ томъ, что онъ очень объемистъ, т. е. настолько разбавленъ азотомъ, что проводка его для пользованія въ домашнемъ обиходѣ обошлась бы слишкомъ дорого, такъ какъ пришлось бы прибѣгнуть къ прокладкѣ трубъ очень большого діаметра. На металлургическихъ заводахъ разстоянія, на которыя приходится проводить газъ, настолько невелики, что это обстоятельство не играетъ серьезной роли.

Для нагрѣванія желѣза и для расплавленія стали почти исключительно пользуются генераторнымъ газомъ. Поэтому, говоря о газовомъ отопленіи для этихъ цѣлей, обыкновенно подразумѣваютъ отопленіе генераторнымъ газомъ. Для нагрѣванія дутья и для отопленія паровыхъ котловъ, обслуживающихъ доменную печь, пользуются колошниковыми газами. За послѣднее время

колошниковыми газами стали пользоваться также для приведенія въ дѣйствіе газовыхъ двигателей. Для нагрѣванія и плавленія стали, однако, эти газы не примѣняются.

Выше нами былъ разсмотрѣнъ крайній типъ прямого отопленія. Во многихъ случаяхъ, хотя количество кислорода, проходящаго черезъ топливо, не соединяясь, бываетъ и значительно, однако все же не достаточно для того, чтобы происходило полное сгораніе окиси углерода и углеводородовъ. Въ такихъ случаяхъ выше топлива впускаютъ воздухъ, часто подогрѣтый. Такой способъ отопленія является промежуточнымъ между газовымъ отопленіемъ и прямымъ отопленіемъ.

319) Цѣль превращенія топлива въ газъ.—Газовыя печи, главнымъ образомъ типа Сименса (§ 279), примѣняются для мартеновскаго процесса, а также въ значительной мѣрѣ для

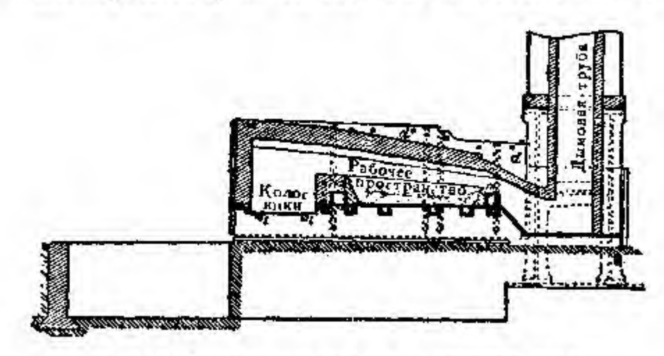


Рис. 116. Отражательная печь (пудлинговая).

нагрѣванія стали и для плавленія ея при тигельномъ процессѣ. Въ другихъ отрасляхъ металлургіи ими пользуются сравнительно мало. Спрашивается, чѣмъ это можно объяснить, ибо, очевидно, здѣсь играетъ роль не незнаніе, а какое-то существенное различіе въ условіяхъ производства.

Разсматриваемыя нами газовыя печи представляютъ собою отражательныя печи; такимъ образомъ, въ сущности намъ надо выяснить вопросъ объ относительныхъ достоинствахъ отражательныхъ печей съ газовымъ отопленіемъ (рис. 98 и 99) и отражательныхъ печей съ прямымъ отопленіемъ (рис. 116).

Любую отражательную печь мы можемъ разсматривать какъ систему, служащую для нагрѣванія металла или другого матеріала при помощи пламени, охватывающаго послѣдній съ боковъ, или, чаще, сверху. Эта система можетъ быть подраздѣлена на слѣ-

дующія части: 1) подготовительная часть, гдѣ топливо превращается въ газъ и гдѣ происходитъ подогрѣваніе воздуха; 2) рабочее пространство, гдѣ металлъ нагрѣвается, плавится и т. д.; 3) дымоходъ, черезъ который удаляются продукты горѣнія. При сравненіи системъ съ газовымъ и прямымъ отопленіемъ прежде всего бросается въ глазъ огромное различіе между объемомъ подготовительной части въ первомъ случаѣ и во второмъ случаѣ, тогда какъ размѣры дымоходовъ въ обоихъ случаяхъ почти одинаковы. Это не трудно видѣть, если сравнить печь Сименса, изображенную на рис. 98—101, съ обыкновенной пудлинговой печью съ прямымъ отопленіемъ (рис. 116). Подготовительная часть печи Сименса почти втрое больше рабочаго пространства, включая же газовый генераторъ, пожалуй, даже вчетверо больше. Подготовительная же часть печи съ прямымъ отопленіемъ часто почти вдвое меньше рабочаго пространства.

Такимъ образомъ, при системѣ Сименса приходится дѣлать подготовительную часть печи въ четыре раза больше, при чемъ, конечно, соотвѣтственно увеличивается стоимость постройки и ремонта.

Имѣются газовыя печи и иныхъ системъ, напр. рекуперативныя (печь Morgan'а, рис. 113), подготовительная часть которыхъ гораздо меньше и дешевле, чѣмъ у печей Сименса. Въ рекуперативныхъ печахъ улавливаютъ теплоту, заключающуюся въ продуктахъ горѣнія, заставляя ихъ нагрѣвать систему глиняныхъ трубъ, черезъ которыя проходитъ воздухъ, служащій для горѣнія газа, или, наоборотъ, заставляя продукты горѣнія проходить черезъ трубы и пропуская вокругъ послѣднихъ воздухъ.

Стоимость первоначальнаго устройства рекуперативныхъ печей не такъ огромна, какъ сименсовскихъ, но все же очень велика. Въ настоящемъ изложеніи мы ограничимся сравненіемъ системы прямого отопленія съ системой Сименса, ибо, хотя устройство рекуперативной системы и дешевле системы Сименса, но въ отношеніи экономіи топлива въ большинствѣ случаевъ она менѣе выгодна, и ремонтъ ея обходится, пожалуй, дороже.

Очевидно, что выгодность системы Сименса безспорна, разъ не останавливаются передъ большими расходами на ея устройство и ея поддержаніе.

Посмотримъ, въ чемъ же заключается ея выгодность.

320) Выгоды газоваго отопленія слѣдующія:

1) Температура и характеръ пламени легче поддаются контролю.

2) Экономія въ топливѣ. При системѣ Сименса улавливается тепло, которое при прямомъ отопленіи уносится продуктами горѣнія.

3) Возможность достигать болѣе высокой температуры. — Благодаря тому, что улавливается тепло продуктовъ горѣнія, при системѣ Сименса можно достигнуть гораздо болѣе высокой температуры, чѣмъ при прямомъ отопленіи; предѣлъ повышенію температуры ставитъ только опасность расплавить тѣ матеріалы, изъ которыхъ сдѣлана сама печь. Въ самомъ дѣлѣ, при мартеновскомъ процессѣ надо очень внимательно слѣдить за тѣмъ, чтобы не расплавить печь, несмотря на то что она строится изъ самыхъ огнеупорныхъ кирпичей. Разсмотримъ указанныя выгоды болѣе детально.

321) Контроль температуры и характера мламени[1]. — Мы можемъ принять, что горѣніе угля совершается въ четыре фазы.

A) Уголь сгораетъ на колосникахъ съ образованіемъ углекислоты,

[26] . . . . $C + 2\,O = CO_2$;

B) Углекислота подъ дѣйствіемъ углерода вышерасположеннаго топлива возстановляется въ окись углерода,

[27] . . . . $CO_2 + C = 2\,CO$;

---

[1]) Окислительное, нейтральное и возстановительное пламя. Обычно говорятъ, что пламя газовой печи можно сдѣлать, по желанію, окислительнымъ, нейтральнымъ или возстановительнымъ. Но «возстановительное» пламя,—это относительный терминъ. Пламя, которое возстановительно по отношенію къ мѣди, можетъ быть сильно окислительнымъ по отношенію къ желѣзу. Для того, чтобы развить высокую температуру, которая необходима при нагрѣваніи желѣза для прокатки или для плавленія стали, надо, чтобы горѣніе шло почти нацѣло, т. е. чтобы большая часть водорода, углеводородовъ и окиси углерода превратилась въ водяной паръ и углекислоту. Очевидно, такое пламя будетъ окислительнымъ по отношенію къ желѣзу, потому что желѣзо при высокой температурѣ легко окисляется какъ водянымъ паромъ, такъ и углекислотой. Поэтому, если въ металлургіи желѣза мы будемъ говорить о «возстановительномъ» пламени, то это поведетъ только къ недоразумѣнію. Мы можемъ говорить только о болѣе или менѣе сильно окислительномъ пламени.

C) Углеводороды отгоняются изъ топлива;

D) Окись углерода и углеводороды сгораютъ съ образованіемъ водяного пара и углекислоты. Въ смѣси съ послѣдними находится атмосферный азотъ.

[32] . . . . $CO + O = CO_2$

[33] . . . . $2H + O = H_2O$.

Если бы горѣніе угля останавливалось на фазѣ *A*, то пламени бы не было, такъ какъ пламя есть горящій газъ. Твердое тѣло при горѣніи не даетъ пламени, если не образуется горючаго газа. Горѣніе этого газа и образуетъ пламя, при чемъ кажется, будто бы горитъ само твердое тѣло. На самомъ же дѣлѣ горитъ газъ, развивающійся изъ твердаго тѣла.

Въ настоящемъ случаѣ пламя происходитъ вслѣдствіе горѣнія окиси углерода, образующейся въ фазахъ *A* и *B*, и углеводородовъ, образующихся въ фазѣ *C*. Горѣніе этихъ газовъ и представляетъ собою фазу *D*.

Окись углерода и углеводороды фазъ *B* и *C* играютъ по отношенію къ желѣзу возстановительную роль, углекислота же и водяной паръ фазъ *A* и *D*—окислительную. Присутствіе свободнаго кислорода усиливаетъ окислительный характеръ пламени. Если притокъ воздуха недостаточенъ для полнаго сгоранія окиси углерода и углеводородовъ, пламя принимаетъ болѣе возстановительный характеръ. Фазы *A* и *D*, такимъ образомъ, усиливаютъ, фазы же *B* и *C* ослабляютъ окисленіе. Далѣе *A* и *D* экзотермичны, *B* и *C* эндотермичны.

Отсюда слѣдуетъ, что фазы *B* и *C*, съ одной стороны, и фазы *A* и *D*, съ другой, должны протекать постоянно до одной той же степени, если мы желаемъ, чтобы окислительная способность пламени и его температура оставались постоянны.

Легко убѣдиться въ томъ, что такого рода контроль гораздо легче при газовомъ отопленіи, чѣмъ при прямомъ.

Положимъ, что при прямомъ отопленіи уголь насыпанъ на колосники такъ ровно, что количество кислорода, проходящаго черезъ болѣе широкіе промежутки между кусками угля и достигающаго верхней поверхности, не соединившись съ послѣднимъ, только-только достаточно для полнаго сгоранія горючихъ газовъ, съ которыми онъ встрѣчается, а именно 1) окиси углерода, возникающей (фазы *A* и *B*) въ болѣе узкихъ промежуткахъ, бла-

годаря тому, что въ нихъ кислородъ больше подвергается дѣйствію топлива и 2) углеводородовъ, оттоняющихся изъ свѣжезасыпаннаго топлива.

Здѣсь факторами, способствующими окисленію, являются 1) притокъ свободнаго кислорода и 2) неполное превращеніе углекислоты въ окись углерода (фаза *B*); факторы же, способствующіе возстановленію, 1) притокъ окиси углерода (фаза *B*) и углеводородовъ (фаза *C*). Характеръ пламени зависитъ отъ равновѣсія между этими двумя группами факторовъ равновѣсія, которое, очевидно, должно сильно колебаться при прямомъ отопленіи. Ибо, по мѣрѣ горѣнія топлива, промежутки между кусками, черезъ которые проходитъ воздухъ, расширяются, и соприкосновеніе между воздухомъ и топливомъ становится менѣе тѣснымъ; вслѣдствіе этого пропорція свободнаго кислорода и угольной кислоты увеличивается, притокъ же окиси углерода уменьшается. Кромѣ того, чѣмъ шире промежутки, тѣмъ большее количество воздуха черезъ нихъ проходитъ и тѣмъ скорѣе они увеличиваются; это обстоятельство, въ свою очередь, способствуетъ увеличенію пропорціи свободнаго кислорода и углекислоты. Въ болѣе узкихъ промежуткахъ превращеніе углекислоты въ окись углерода происходитъ все менѣе полно не только потому, что они непрерывно расширяются, но еще и потому, что пропорція проходящаго черезъ нихъ воздуха постепенно уменьшается. Такимъ образомъ оба вышеуказанныхъ обстоятельства способствуютъ уменьшенію образованія окиси углерода.

Въ то же время и количество образующихся углеводородовъ быстро уменьшается, такъ какъ свѣжій уголь подсыпаютъ тонкимъ слоемъ, и запасъ углеводородовъ, содержащихся въ немъ, быстро изсякаетъ.

Итакъ равновѣсіе быстро смѣщается въ сторону болѣе сильнаго окисленія, вслѣдствіе увеличенія пропорціи свободнаго кислорода и углекислоты и одновременнаго уменьшенія притока окиси углерода и углеводородовъ.

Количество развиваемаго при горѣніи тепла должно измѣняться точно такимъ же образомъ. Оно зависитъ отъ отношенія между притокомъ свободнаго кислорода и притокомъ окиси углерода и углеводородовъ. Измѣненіе развивающейся температуры пропорціонально измѣненію этого отношенія. При извѣстномъ отношеніи между количествомъ свободнаго кислорода и количе-

ствомъ окиси углерода и углеводородовъ развивается наивысшая температура. Измѣненіе этого отношенія, въ сторону ли уменьшенія количества окиси углерода и углеводородовъ и увеличенія количества свободнаго кислорода, или наоборотъ, ведетъ къ пониженію температуры.

При газовомъ отопленіи, какъ ниже будетъ указано, контроль условій горѣнія гораздо легче. Степень превращенія углекислоты въ окись углерода измѣняется при прямомъ отопленіи потому, что слой угля по необходимости долженъ быть тонокъ; тѣмъ же самымъ объясняется измѣненіе пропорціи свободнаго, избѣжавшаго вступленія въ реакцію съ углемъ, кислорода и быстрое истощеніе запаса углеводородовъ. Во избѣжаніе этихъ измѣненій и быстраго истощенія запаса углеводородовъ приходится засыпать очень толстый слой угля, какъ это и дѣлается при газовомъ отопленіи. При такомъ толстомъ слоѣ топлива весь кислородъ вступаетъ въ реакцію съ углемъ, и углекислота почти нацѣло превращается въ окись углерода, такъ что притокъ окиси углерода и углеводородовъ оказывается почти постояннымъ. Газъ получается въ особомъ аппаратѣ, называемомъ генераторомъ, при постоянныхъ и поддающихся контролю условіяхъ. Газъ сгораетъ и даетъ пламя уже въ самомъ рабочемъ пространствѣ, куда для этого впускается воздухъ. Отдѣльно получая газъ и затѣмъ уже его сжигая, мы получаемъ лучшую возможность регулировать ту и другую операцію. Регулированія окислительной способности пламени и его температуры достигаютъ, измѣняя при помощи клапановъ притокъ газа и воздуха.

Примѣромъ печи съ газовымъ отопленіемъ можетъ служить печь Morgan'а, изображенная на рис. 113. Если оставить въ сторонѣ крайне простыя приспособленія для подогрѣванія воздуха, служащаго для горѣнія газа, то ясно видно, что остальныя части печи служатъ для вышеуказаннаго контроля надъ характеромъ и температурой пламени.

322) Экономія въ топливѣ.—Въ большинствѣ отражательныхъ печей температура пламени на всемъ протяженіи рабочаго пространства должна быть очень высока; особенно въ мартеновской печи, въ которой температура на всемъ протяженіи рабочаго пространства должна быть выше точки плавленія стали, скажемъ около 1,600°Ц. Отсюда слѣдуетъ, что пламя должно выходить изъ рабочаго пространства при очень высокой температурѣ и уносить очень много тепла. При печахъ съ прямымъ

отопленіемъ большая часть тепла, развивающагося при горѣніи топлива, такимъ образомъ теряется даромъ, особенно въ конечномъ періодѣ нагрѣванія, когда температура нагрѣваемыхъ болванокъ почти достигаетъ температуры пламени, и способность ихъ къ дальнѣйшему поглощенію тепла пламени становится очень мала.

Газовое отопленіе даетъ возможность улавливать это тепло путемъ подогрѣванія воздуха при помощи регенеративной (Siemens) или рекуперативной системы.

Конечно, значительную часть тепла можно уловить, пропуская пламя подъ паровые котлы. Этому методу однако свойственны очень значительныя неудобства, изъ которыхъ главное состоитъ въ томъ, что при немъ паровые котлы работаютъ неравномѣрно. По этой причинѣ, въ нѣкоторыхъ случаяхъ находили, что отапливать паровые котлы газами подогрѣвательныхъ печей даже менѣе выгодно, чѣмъ топливомъ. Короче говоря, улавливать тепло по этому методу можетъ быть невыгодно, если топливо очень дешево.

Регенеративныя и рекуперативныя приспособленія, служащія для улавливанія тепла, уходящаго съ продуктами горѣнія изъ рабочаго пространства, не такъ важны или даже теряютъ всякое значеніе, если это тепло можно утилизировать въ самомъ рабочемъ пространствѣ. Иногда этого возможно достигнуть, какъ, напр., въ непрерывно дѣйствующей подогрѣвательной печи Morgan'a, рис. 113. Въ послѣднюю холодныя болванки одна за другой загружаются черезъ короткіе промежутки времени съ одного конца и постепенно проталкиваются къ другому концу, гдѣ самая высокая температура. Пламя проходитъ надъ болванками въ противоположномъ ихъ движенію направленіи, при чемъ продукты горѣнія отдаютъ очень значительную часть своего тепла въ самомъ рабочемъ пространствѣ и, по выходѣ изъ него, обладаютъ настолько низкой температурой, что дальнѣйшее улавливаніе тепла не представляетъ никакой выгоды. Это можетъ служить примѣромъ того вполнѣ очевиднаго положенія, что большія затраты на улавливаніе тепла продуктовъ горѣнія выгодны только тогда, когда эти продукты горѣнія содержатъ много тепла, т. е. когда температура ихъ по выходѣ изъ рабочаго пространства очень высока или когда ихъ количество очень велико. Вслѣдствіе того, что въ печи Morgan'a большая часть тепла продуктовъ горѣнія улавливается болванками, представляется

возможнымъ съ небольшой затратой устроить рекуперативную систему для улавливанія еще нѣкоторой дальнѣйшей части этого тепла.

Въ этомъ и кроется причина того, что газовое отопленіе примѣняется, главнымъ образомъ, въ металлургіи желѣза и стали, и что примѣненіе его въ другихъ отрасляхъ металлургіи оказалось невыгоднымъ. Въ другихъ отрасляхъ металлугіи процессы ведутся или въ сравнительно маломъ масштабѣ или при сравнительно низкой температурѣ. Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ количество тепла,уходящее съ продуктами горѣнія, относительно незначительно.

Такъ, при рафинированіи мѣди температура настолько низка и продукты горѣнія содержатъ такъ мало тепла, что никакое приспособленіе для его улавливанія обычно не можетъ окупаться.

Конечно, цѣнность тепла обусловливается стоимостью его полученія. Если топливо, по мѣстнымъ условіямъ, очень дорого и если стоимость единицы тепла соотвѣтственно высока, тогда устройство приспособленія для улавливанія тепла продуктовъ горѣнія при рафинированіи мѣди можетъ оказаться выгоднымъ. То, что можетъ быть выгоднымъ въ Швеціи, гдѣ уголь дорогъ, можетъ быть невыгоднымъ въ Питтсбургѣ, гдѣ уголь дешевъ.

323) Сравненіе регенеративныхъ печей съ рекуперативными.—Припомнимъ, существенныя черты регенеративной системы Сименса и рекуперативной системы.

Регенеративная система Сименса состоитъ въ томъ, что продукты горѣнія пропускаютъ черезъ большія камеры, заполненныя кирпичной кладкой въ видѣ клѣтки, которой они отдаютъ свое тепло. Затѣмъ черезъ тѣ же камеры пропускаютъ въ отдѣльности газъ и воздухъ, которые отнимаютъ тепло отъ клѣтки, послѣ чего приходятъ въ соприкосновеніе другъ съ другомъ и сгораютъ. Камеры эти носятъ названіе регенераторовъ (§ 279).

При рекуперативной системѣ тепло продуктовъ горѣнія улавливается рядомъ глиняныхъ трубъ, внутри которыхъ проходитъ воздухъ, служащій для горѣнія газа, или наоборотъ (рис. 113).

Преимущество системы Сименса состоитъ въ томъ, что при ней гораздо полнѣе происходитъ улавливаніе тепла продуктовъ горѣнія, главнымъ образомъ потому, что при ней тепло улавливается лицевой поверхностью кирпичей, при рекуперативной же системѣ—внутренней поверхностью глиняныхъ трубъ.

Вторая причина преимущества системы Сименса та, что при ней, для регенераціи тепла, могутъ служить какъ воздухъ, такъ и газъ, тогда какъ при рекуперативной системѣ для этой цѣли можетъ служить только воздухъ. Прежде этому преимуществу системы Сименса придавали большое значеніе. Но ближайшее разсмотрѣніе и особенно опытъ послѣднихъ лѣтъ указываютъ, что это преимущество не имѣетъ большой цѣны и что выигрышъ при примѣненіи газовыхъ регенераторовъ на ряду съ воздушными регенераторами не великъ. Мы вернемся къ этому вопросу въ § 325.

Далѣе, въ пользу системы Сименса говоритъ большая легкость и дешевизна ремонта, по крайней мѣрѣ въ тѣхъ случаяхъ, когда въ регенераторахъ развивается очень высокая температура. Простые кирпичи, служащіе для улавливанія тепла, не только дешевы, но и гораздо болѣе прочны, чѣмъ глиняныя трубы или соотвѣтствующія имъ приспособленія, примѣняемыя при рекуперативной системѣ.

324) Различіе въ способѣ улавливанія тепла при регенеративной и рекуперативной системѣ.—При регенеративной системѣ одна и та же поверхность кирпичей служитъ при одной фазѣ для улавливанія тепла, и для отдачи его газу или воздуху при другой фазѣ. Та же самая поверхность служитъ и для улавливанія и для отдачи тепла. При рекуперативной же системѣ продукты горѣнія приходятъ въ соприкосновеніе съ одной поверхностью глиняныхъ трубъ, воздухъ же — съ другой поверхностью. Одна поверхность трубъ служитъ для улавливанія тепла, другая для отдачи его. Такимъ образомъ, улавливающая тепло поверхность и отдающая его раздѣлены между собою глиняною стѣнкою, которая, будучи дурнымъ проводникомъ тепла, сильно затрудняетъ обмѣнъ тепла между этими поверхностями и уменьшаетъ дѣйствительность аппарата, какъ прибора, служащаго для передачи тепла продуктовъ горѣнія поступающему воздуху. Трубы эти, повидимому, должны неизбѣжно дѣлаться изъ глины. Металлическія трубы подвергались бы слишкомъ быстро разрушенію, другихъ же веществъ съ хорошей теплопроводностью, повидимому, не имѣется, по крайней мѣрѣ для высокихъ температуръ.

Съ другой стороны, только холодный предметъ можетъ хорошо улавливать тепло; чѣмъ выше его температура, тѣмъ меньше

онъ можетъ отнять тепла отъ проходящихъ мимо его продуктовъ горѣнія.

При системѣ Сименса улавливающая тепло поверхность регенераторовъ къ началу новой фазы сильно охлаждается подъ вліяніемъ непосредственнаго соприкосновенія съ вступающими газомъ и воздухомъ. При рекуперативной же системѣ такому полному охлажденію улавливающей тепло поверхности препятствуетъ плохая теплопроводность стѣнокъ глиняныхъ трубъ. Однимъ словомъ, при системѣ Сименса тепло улавливается лицевой поверхностью глиняной массы; при рекуперативной же системѣ—внутренней стороной.

325) Значеніе газовой регенераціи.—Сперва я изложу тѣ основанія, на которыхъ газовой регенераціи придавали раньше такое большое значеніе, а затѣмъ постараюсь выяснить, почему надо полагать, что значеніе ея гораздо меньше, чѣмъ раньше думали. Для того, чтобы система, служащая для улавливанія тепла, могла функціонировать, необходимы два условія: во-первыхъ, чтобы она имѣла возможность улавливать тепло; во-вторыхъ, чтобы она могла нацѣло его отдавать. Никакая подобная система не въ состояніи безпредѣльно накоплять тепло. Регенераторы Сименса, нагрѣвшись до температуры продуктовъ горѣнія, не были бы въ состояніи далѣе отнимать отъ послѣднихъ тепло. Только отдавъ накопленное тепло, регенераторъ вновь получаетъ способность его улавливать.

Разумѣется также, что продукты горѣнія не въ состояніи нагрѣть регенераторъ до болѣе высокой температуры, чѣмъ ихъ собственная.

Источникомъ пламени, а слѣдовательно и продуктовъ горѣнія, служатъ генеративный газъ и воздухъ. При рекуперативной системѣ тепло, накопившееся въ трубахъ, отнимается только воздухомъ, тогда какъ при системѣ Сименса въ этомъ принимаютъ обычно участіе какъ воздухъ, такъ и газъ. Такъ какъ вѣсъ газа и воздуха равенъ вѣсу продуктовъ горѣнія и такъ какъ (если мы предположимъ, для упрощенія, что теплоемкость газа, воздуха и продуктовъ горѣнія одинаковы) теплоемкость ихъ (вѣсъ $\times$ удѣльную теплоемкость) равна теплоемкости продуктовъ горѣнія, то, теоретически, воздухъ и газъ способны поглотить все тепло продуктовъ горѣнія. Иначе говоря, теоретически можно себѣ представить, что при отсутствіи потери

тепла черезъ стѣнки регенератора продукты горѣнія будутъ охлаждаться до температуры вступающихъ воздуха и газа, а въ слѣдующей фазѣ газъ и воздухъ будутъ нагрѣваться до той температуры, при которой продукты горѣнія выходятъ изъ рабочаго пространства. При этомъ, слѣдовательно, вступающіе газъ и воздухъ отнимали бы все тепло отъ продуктовъ горѣнія.

Конечно, подобнаго результата вполнѣ никогда нельзя достигнуть. Онъ является только предѣломъ, къ которому приходится стремиться.

При рекуперативной системѣ теоретически возможно уловить только половину тепла продуктовъ горѣнія, такъ какъ вѣсъ воздуха составляетъ около половины вѣса продуктовъ горѣнія, и такъ какъ только воздухъ служитъ для поглощенія ихъ тепла. Очевидно, что продукты горѣнія не могутъ нагрѣть воздуха до болѣе высокой температуры, чѣмъ та, которой они обладаютъ, а слѣдовательно они могутъ отдать ему только половину своего тепла.

Для примѣра разсмотримъ слѣдующій случай. Положимъ, что мы имѣемъ чистый генераторный газъ, т. е. безъ примѣси водяного газа, и что для сгоранія 100 частей генераторнаго газа по вѣсу требуется 120 частей воздуха.

Положимъ, что

w' = вѣсу воздуха, служащаго въ генераторѣ для превращенія тонны угля въ газъ.

w'' = вѣсу воздуха, служащаго для сгоранія этого газа въ рабочемъ пространствѣ.

w''' = вѣсу газа.

W = вѣсу продуктовъ горѣнія.

T = температурѣ, при которой продукты горѣнія выходятъ изъ рабочаго пространства.

Sh = теплоемкости газа, воздуха и продуктовъ горѣнія. Теплоемкость ихъ, для упрощенія, принимается одинаковой.

H = количеству тепла, заключающемуся въ продуктахъ горѣнія при выходѣ изъ рабочаго пространства на тонну угля.

hS = количеству тепла, которое возможно получить обратно при системѣ Сименса.

hr = количеству тепла, которое возможно получить обратно при помощи рекуперативной системы.

Согласно сдѣланнымъ нами допущеніямъ, слѣдовательно,

[1] . . . . $w''' = w' + 1$,
[2] . . . . $W = w'' + w'''$,
[3] . . . . $H = W \times T \times Sh$,
[4] . . . . $w'' = w''' \times 1{,}2$.

Для упрощенія допустимъ, что температура какъ воздуха, такъ и газа при поступленіи въ регенераторы одинакова съ температурой, при которой продукты горѣнія выходятъ изъ регенераторовъ.

При системѣ Сименса какъ газъ, такъ и воздухъ служатъ для регенераціи тепла; отсюда слѣдуетъ

[5] . . . . $hS = (w'' + w''') \times T \times Sh$.

При рекуперативной же системѣ тепло регенерируется только при помощи воздуха, служащаго для горѣнія газа; отсюда слѣдуетъ

[6] . . . . $hr = w'' \times T \times Sh$.

Изъ (4) получаемъ

[7] . . . . $hS = hr\,(1{,}2 + 1) \div 1{,}2 = hr1{,}83$,

или, другими словами, регенеративная система должна на 83% лучше улавливать тепло, чѣмъ рекуперативная.

Недостатокъ рекуперативной системы, заключающійся въ томъ, что поступающій газъ не можетъ служить для отнятія тепла отъ продуктовъ горѣнія, повидимому, неизбѣженъ. Нельзя себѣ представить, какимъ образомъ можно было бы пропускать газъ черезъ рекуперативныя трубы. Дѣло въ томъ, что углеводороды генераторнаго газа разлагаются при высокой температурѣ, и отлагающійся уголь долженъ очень скоро вызывать закупориваніе трубъ. При системѣ Сименса это затрудненіе не возникаетъ, потому что уголь, отлагающійся на поверхности кирпичей регенератора, въ слѣдующую фазу сгораетъ подъ вліяніемъ свободнаго кислорода, всегда присутствующаго въ продуктахъ горѣнія.

При ближайшемъ изслѣдованіи, однако, оказывается, что преимущество газовой регенераціи гораздо меньше, чѣмъ это слѣдуетъ изъ нашихъ расчетовъ. Во-первыхъ, потери вслѣдствіе лучеиспусканія съ внѣшней стороны регенераторовъ, а

также тепло, необходимое для поддержанія тяги въ дымовой трубѣ, составляютъ значительную часть тепла продуктовъ горѣнія. Такимъ образомъ, количество тепла, которое можетъ быть уловлено при помощи какой бы то ни было системы, на самомъ дѣлѣ меньше теоретическаго, а слѣдовательно и избытокъ тепла, который можно уловить при примѣненіи газовой регенераціи, помимо воздушной, также оказывается менѣе значительнымъ. Во-вторыхъ, газъ только потому и отнимаетъ тепло отъ регенераторовъ, что онъ вступаетъ въ нихъ, обладая низкой температурой. При газовой же регенераціи значительное количество тепла, развивающееся въ генераторѣ, теряется или, по крайней мѣрѣ, соотвѣтственно понижаетъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія газоваго регенератора.

Но, вопреки этимъ соображеніямъ, всѣ расчеты приводятъ къ тому, что газовая регенерація должна представлять значительную выгоду.

Далѣе Сименсъ руководствовался тѣмъ, что, разъ газовая регенерація играетъ столь важную роль и разъ тепло, вносимое генераторнымъ газомъ въ регенераторы, только пропорціонально уменьшаетъ коэффиціентъ ихъ полезнаго дѣйствія, то и нѣтъ никакой выгоды улавливать это тепло. Поэтому Сименсъ располагалъ генераторы какъ удобнѣе, обыкновенно на большомъ разстояніи отъ печи. Тепло, развивающееся въ генераторѣ, частью утилизировалось для полученія водяного газа, какъ это будетъ пояснено въ § 330, частью же терялось путемъ лучеиспусканія черезъ стѣнки генератора и трубъ, часто очень длинныхъ, по которымъ газъ поступаетъ въ печь.

Если бы въ дѣйствительности температура газа при выходѣ изъ генератора была такъ же высока, какъ та, до которой его обыкновенно подогрѣваютъ въ газовомъ регенераторѣ, и если бы мы давали ему предварительно охлаждаться до такой степени, чтобы онъ былъ въ состояніи поглощать въ регенераторѣ тепло продуктовъ горѣнія, мы не выиграли бы ровно ничего. Потерять одну калорію для того, чтобы съэкономить другую калорію, не имѣетъ смысла.

Большую часть тепла, развивающагося въ генераторѣ, можно утилизировать, получая водяной газъ при помощи пара, впускаемаго вмѣстѣ съ дутьемъ, однако и въ этомъ отношеніи мы ограничены извѣстнымъ предѣломъ, благодаря тому обстоятель-

ству, что температура генератора не должна падать ниже извѣстной точки; въ противномъ случаѣ горѣніе должно прекратиться и дутье и паръ будутъ проходить черезъ слой угля, безъ того, чтобы образовывался газъ. Поэтому температура газа при выходѣ его черезъ верхнюю поверхность слоя угля по необходимости должна быть высока.

Обозначимъ температуру, до которой газъ обыкновенно подогрѣваютъ въ регенераторѣ черезъ T^{h}, низшую температуру, которую онъ можетъ имѣть при выходѣ черезъ верхнюю поверхность топлива въ генераторѣ, черезъ T^{p}; тогда количество тепла, которое газъ можетъ отнять отъ продуктовъ горѣнія, будетъ

$$w''' \times Sh \times (T^{h} - T^{p}).$$

Какова эта разница температуръ $T^{h} - T^{p}$, еще не установлено. Повидимому, она не очень велика. Поэтому, насколько можно судить, газовая регенерація не представляетъ особой выгоды.

Существуетъ еще одно обстоятельство, которое также уменьшаетъ значеніе газовой регенераціи. Генераторный газъ, получаемый изъ битуминознаго угля, можетъ содержать много углеводородовъ, которые при сильномъ нагрѣваніи распадаются съ выдѣленіемъ сажи. Если генераторный газъ непосредственно поступаетъ въ рабочее пространство печи, т. е. если не примѣняется газовая регенерація, выдѣляющійся уголь тотчасъ сгораетъ и такимъ образомъ утилизируется. При примѣненіи же газовой регенераціи, газъ вступаетъ въ горячій регенераторъ, распадается и уголь отлагается на кирпичахъ, гдѣ онъ и остается въ инертномъ состояніи до слѣдующей фазы, когда черезъ тотъ же регенераторъ пропускаются продукты горѣнія. Придя въ соприкосновеніе съ продуктами горѣнія, этотъ уголь сгораетъ и тепло, развивающееся при его горѣніи, уходитъ съ ними въ дымовую трубу и теряется.

Повидимому, этими двумя обстоятельствами и объясняется, что опыты, поставленные за послѣднее время въ большомъ масштабѣ, доказали отсутствіе всякаго значенія газовой регенераціи. Именно, въ одномъ случаѣ мартеновскія печи работали съ газовой регенераціей, въ другомъ, для прямого сравненія при всѣхъ прочихъ равныхъ условіяхъ, газъ впускался изъ генера-

тора прямо въ рабочее пространство. Въ послѣднемъ случаѣ, на изготовленіе стальныхъ болванокъ, на тонну, пошло не больше угля, чѣмъ при примѣненіи газовой регенераціи.

Насколько это справедливо при другихъ условіяхъ, еще не установлено. Быть можетъ, что въ данномъ частномъ случаѣ генераторъ работалъ при слишкомъ высокой температурѣ, такъ что разница $T^b - T^p$ была слишкомъ мала, и что получилась бы экономія, если бы въ генераторъ вводилось большее количество пара, т. е. если бы поддерживалась болѣе низкая температура T^p.

326) Прогрессивное повышеніе температуры въ регенераторныхъ печахъ.—При системѣ Сименса, въ рабочемъ пространствѣ происходитъ горѣніе газа и воздуха, подогрѣтыхъ до, скажемъ, 1100° Ц. При прямомъ отопленіи происходитъ горѣніе угля, при чемъ для этого служитъ неподогрѣтый воздухъ. Очевидно, что, начинаясь при болѣе высокой температурѣ, горѣніе должно развить гораздо болѣе высокую температуру при регенеративномъ отопленіи, чѣмъ при прямомъ. Кромѣ того, температура должна повышаться каждый разъ, какъ мы измѣняемъ направленіе тока газовъ въ регенераторахъ. Представимъ себѣ слѣдующее. При горѣніи данной смѣси газа и воздуха, первоначальная температура которыхъ равна 0°, развивается достаточно тепла для того, чтобы поднять температуру продуктовъ горѣнія до 1500°. Проходя черезъ регенераторы, продукты горѣнія нагрѣваютъ ихъ до 1300°. Проходя черезъ тѣ же регенераторы, при обратномъ токѣ, газъ и воздухъ нагрѣваются до 1100°. При прочихъ равныхъ условіяхъ, при горѣніи газа и воздуха должно развиться достаточно тепла для того, чтобы температура продуктовъ горѣнія была выше температуры газа и воздуха на 1500°. Слѣдовательно температура должна подняться до $1500° + 1100° = 2600°$.

Подобное повышеніе температуры должно было бы наблюдаться при каждомъ измѣненіи направленія тока газовъ въ регенераторахъ, если бы этотъ процессъ и дальше шелъ такимъ же образомъ.

На самомъ дѣлѣ, хотя въ печахъ, снабженныхъ большими регенераторами, и можно быстро поднять температуру до точки, при которой началось бы уже разрушеніе кирпичной кладки, однако все же она поднимается гораздо медленнѣе, чѣмъ только что было указано. По мѣрѣ повышенія температуры, потеря

тепла черезъ стѣнки печи быстро увеличивается. Дѣйствительно, тепло теряется съ такою же быстротою, съ какою уходилъ бы паръ или другой газъ, заключенный подъ высокимъ давленіемъ въ печь съ пористыми стѣнками. Такой взглядъ на потерю тепла черезъ стѣнки печей для высокихъ температуръ очень удобенъ [1]).

На самомъ дѣлѣ температура регенераторовъ, а слѣдовательно и температура поступающихъ газа и воздуха и рабочаго пространства, продолжаетъ повышаться до тѣхъ поръ, пока не наступитъ равновѣсія между тепломъ, развивающимся при горѣніи, и тепломъ, теряющимся черезъ стѣнки печи и дымохода, плюсъ тепломъ, идущимъ на нагрѣваніе обрабатываемаго металла.

Остается однако на лицо тотъ фактъ, что чрезвычайно быстраго повышенія температуры рабочаго пространства можно достигнуть, измѣняя направленіе тока газовъ черезъ очень короткіе промежутки времени. На нѣкоторыхъ заводахъ эти промежутки по временамъ не превышаютъ десяти или даже менѣе минутъ.

327) Газовый генераторъ Сименса. — Какъ уже было указано на рис. 98 и 99, генераторъ Сименса представляетъ собою почти прямоугольную камеру изъ огнеупорнаго кирпича, въ которой помѣщается колосниковая рѣшетка; на задній конецъ послѣдней засыпается уголь.

Колосниковая рѣшетка состоитъ изъ двухъ частей; одна ея часть образована почти горизонтальными брусками, другая — нижней частью наклонной стѣнки, находящейся слѣва. Послѣдняя дѣлается изъ желѣзныхъ плитъ, расположенныхъ такимъ образомъ, что они образуютъ какъ бы рѣшетку.

Цѣль, которую преслѣдуетъ газовый генераторъ, состоитъ въ томъ, чтобы достигнуть болѣе толстого слоя топлива, чѣмъ при прямомъ отопленіи; поэтому, естественно, что Сименсъ сначала примѣнялъ колосниковую рѣшетку очень похожую на

---

[1]) Кромѣ того, по мѣрѣ повышенія температуры горѣніе совершается все менѣе полно потому, что чѣмъ выше температура, тѣмъ дальше идетъ диссоціація продуктовъ горѣнія; или скорѣе потому, что та причина, которая при другихъ условіяхъ вызвала бы диссоціацію, здѣсь въ соотвѣтствующей мѣрѣ ограничиваетъ горѣніе. Но по мѣрѣ того, какъ продукты неполнаго горѣнія охлаждаются, проходя черезъ регенераторы, горѣніе можетъ идти дальше.

ту, которая примѣняется и при прямомъ отопленіи, и только устраивалъ болѣе высокую камеру надъ ней, чтобы удерживать болѣе толстый слой угля.

При этомъ серьезное затрудненіе представляло удаленіе золы изъ-подъ толстого слоя угля, безъ того, чтобы уголь просыпался черезъ рѣшетку вмѣстѣ съ золой. Образованіе и удаленіе золы гораздо болѣе серьезная вещь, чѣмъ это можетъ показаться на первый взглядъ.

Положимъ, что за день превращается въ генераторѣ въ газъ три тонны угля, содержащаго 10% золы, и что съ послѣднею остается въ смѣси 10% несгорѣвшаго угля. Въ такомъ случаѣ ежедневно приходится имѣть дѣло съ 750 фунтами золы, несгорѣвшаго угля и угольной гари. Удаленіе послѣднихъ изъ-подъ толстаго слоя топлива, которое само по себѣ состоитъ изъ небольшихъ кусковъ, было сопряжено съ значительными затрудненіями.

Зола удалялась слѣдующимъ образомъ: сперва ей давали образовать толстый слой. Затѣмъ поперекъ генератора черезъ слой золы пропускали рядъ плоскихъ брусковъ, которые упирались своими концами въ стѣнку генератора (на рис. справа). Эти бруски помѣщались надъ рѣшеткой такимъ образомъ, чтобы подъ ними была большая часть золы, а чтобы остальная часть золы и толстый слой несгорѣвшаго топлива были надъ ними. Потомъ колосники вытаскивались и вся зола ниже брусковъ, лишенная поддержки, проваливалась въ зольникъ. Вслѣдъ за этимъ колосники вновь вставлялись, бруски вытаскивались, и топливо опять ложилось всею своею тяжестью на колосниковую рѣшетку.

Такой способъ былъ очень затруднителенъ, потому что рабочіе при этомъ сильно страдали отъ жара. Кромѣ того, онъ былъ сопряженъ съ потерею топлива, потому что въ смѣси съ золою удалялось много несгорѣвшаго угля. Недостатки этой системы сказывались еще сильнѣе, если для ускоренія работы генератора приходилось впускать въ него воздухъ подъ давленіемъ. Во-первыхъ, въ этомъ случаѣ приходилось удалять золу черезъ большіе промежутки времени, такъ какъ удаленіе золы было сопряжено съ остановкою дутья, а это въ свою очередь останавливало работу генератора или, во всякомъ случаѣ, сильно уменьшало образованіе газа.

Во-вторыхъ, подъ вліяніемъ высокой температуры, развивающейся при быстромъ горѣніи, извѣстная часть золы плавилась

и собиралась въ большіе комки, удаленіе которыхъ изъ-подъ топлива было очень затруднительно.

Комковъ образуется при этихъ условіяхъ гораздо меньше, если пользоваться паромъ для пропусканія воздуха черезъ генераторъ. Это объясняется, во-первыхъ тѣмъ, что происходитъ разложеніе пара, которое идетъ съ большимъ поглощеніемъ тепла

$$[31] \quad \ldots\ldots\ldots \quad H_2O + C = 2H + CO,$$

а слѣдовательно сильно понижаетъ температуру и затрудняетъ плавленіе золы. Во-вторыхъ, изслѣдованіе показало, что пары воды, сгущаясь въ нижнихъ болѣе холодныхъ слояхъ золы, разлагаютъ до извѣстной степени тѣ комки, которые образуются выше, гдѣ идетъ энергичное горѣніе.

Кромѣ того, затрудняя образованіе комковъ и вызывая разложеніе тѣхъ изъ нихъ, которые образуются, пары воды, повидимому, значительно уменьшаютъ количество угля, которое, смѣшиваясь съ этими комками, избѣгаетъ горѣнія и такимъ образомъ теряется. Примѣненіе пара въ генераторахъ представляетъ еще одно преимущество, которое будетъ болѣе понятно послѣ того, какъ мы познакомимся съ § 330.

Но даже при примѣненіи пара, чистка генератора Siemens'а очень затруднительна и сопряжена съ большими неудобствами, вслѣдствіе того, что при этомъ количество образующагося газа сильно падаетъ. Поэтому генераторъ Siemens'а былъ въ значительной степени вытѣсненъ другими болѣе совершенными генераторами. Изъ нихъ заслуживаютъ описанія генераторы W. J. Taylor'а и Duff'а, которые получили очень широкое и успѣшное примѣненіе.

Какъ въ томъ, такъ и въ другомъ удаленіе золы изъ-подъ топлива не вызываетъ остановки въ работѣ генератора. Правда, удаленіе золы изъ генератора Taylor'а можетъ сопровождаться остановкой въ образованіи газа; но къ удаленію золы изъ него приходится прибѣгать настолько рѣдко и оно беретъ такъ мало времени, что это совершенно не составляетъ неудобства.

328) Газовый генераторъ Taylor'а[1]).—Отличительная черта генератора Taylor'а состоитъ въ томъ, что столбъ топлива и

---

[1]) U. S. Patent 399,798, William J. Taylor, R. D. Wood & Co., 400, Chestnut Street, Philadelphia.

золы покоится на круглой пластинѣ, черезъ края которой, при вращенiи, зола ссыпается въ замкнутый зольникъ. Такимъ образомъ, для удаленiя золы не надо касаться топлива или прерывать работу генератора.

Генераторъ, рис. 117, представляетъ собою цилиндрическую камеру, въ нижнемъ концѣ которой находится вращающаяся круглая пластина *AA*; послѣдняя поддерживаетъ толстой слой золы, *BB*, на которомъ лежитъ топливо.

Время отъ времени золу удаляютъ, вращая дно вокругъ вертикальной оси генератора при помощи рукоятки *K*. При этомъ зола сползаетъ по сторонѣ конуса *CA* и попадаетъ въ замкнутый зольникъ *D*. Въ то же время неподвижные стержни *J*, помѣщающiеся въ четырехъ точкахъ по периферiи, сдвигаютъ золу черезъ край пластины *A*. По мѣрѣ того какъ зола, образовавшая въ данный моментъ этотъ конусъ, ссыпается въ зольникъ, на мѣсто ея опускается новая и т. д. Зола въ вертикальномъ отъ *C* направленiи несомнѣнно опускается нѣсколько скорѣе, чѣмъ расположенная лѣвѣе и правѣе, благодаря чему поверхность, отдѣляющая золу отъ топлива, вѣроятно, слѣдуетъ нанесенной мною тройной кривой, а не горизонтальной линiи, какъ указываютъ конструкторы этого генератора. Вреда отъ этого не было однако обнаружено.

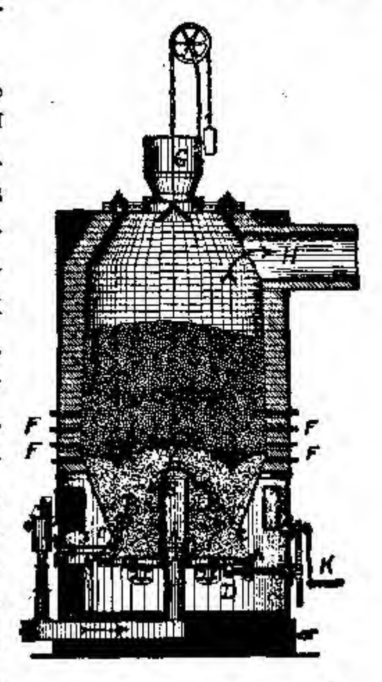


Рис. 117. Газовый генераторъ Taylor'a, съ вращающимся дномъ.

Воздухъ для превращенiя топлива въ газъ нагнетается струею пара черезъ центральную трубу *E*, откуда уже онъ расходится по сторонамъ. Топливо засыпается черезъ аппаратъ *G*; газъ выходитъ черезъ трубу *H*. Черезъ извѣстные промежутки времени, скажемъ отъ 6 до 24 часовъ, дно приводится въ вращенiе, и зола ссыпается внизъ. Черезъ окошечки *FF* наблюдаютъ за тѣмъ, чтобы верхнiй уровень золы былъ на надлежащей вы-

сотѣ. Если бы зола стала ссыпаться слишкомъ быстро, положимъ съ лѣвой стороны, то для того, чтобы замедлить ссыпаніе, достаточно съ этой стороны удалить стержни *J*.

Нижняя часть воронки *C* расположена достаточно высоко надъ вращающимся дномъ *A*, такъ что шлаковые комки обычнаго размѣра могутъ проходить безъ задержки. Болѣе крупные комки можно разбивать ломомъ черезъ отверстія въ воронкѣ. Разстояніе *C* отъ *A* разсчитано такимъ образомъ, что зола можетъ ссыпаться только тогда, когда дно приводится во вращеніе, или, другими словами, ссыпаніе золы поддается постоянному контролю.

Слой золы поддерживается очень толстый для того, чтобы дать полную возможность сгорѣть углю, который случайно минуетъ область наиболѣе энергичнаго горѣнія, а также и для того, чтобы зола могла вполнѣ охладиться и не нагрѣвала движущихся частей аппарата. При этомъ зола попадаетъ въ зольникъ совсѣмъ холодной, благодаря чему очистка его,—положимъ, каждые 24 часа,—обходится дешево. Чтобы заставить дутье проникнуть черезъ толстый слой золы, пришлось бы прибѣгнуть къ очень высокому давленію; поэтому трубу, черезъ которую поступаетъ дутье, доводятъ почти до того мѣста, гдѣ должна начинаться область горѣнія.

Въ простомъ цилиндрическомъ генераторѣ съ горизонтальной колосниковой рѣшеткой со стороны топлива естественно стремленіе опускаться съ наибольшей скоростью по срединѣ, со стороны же дутья подыматься съ наибольшею скоростью вдоль стѣнокъ. Въ генераторѣ Taylor'а первому стремленію препятствуетъ то, что зола ссыпается по периферіи, а второму — то, что дутье вводится по срединѣ.

Повидимому, такое устройство генератора Taylor'а приводитъ до извѣстной степени къ другой крайности, а именно къ тому, что топливо съ наибольшей скоростью опускается по стѣнкамъ, или, вѣрнѣе, надъ краемъ воронки *C*, горѣніе же быстрѣе всего идетъ по серединѣ. Конструкторы, однако, полагаютъ, что все же оба эти процесса въ генераторѣ Taylor'а идутъ съ большею равномѣрностью, чѣмъ въ обычномъ цилиндрическомъ генераторѣ. Этому сильно способствуетъ, повидимому, большая толщина слоевъ угля и золы.

329) Газовый генераторъ Duff'а [1]). — Отличительною чертою этого генератора (рис. 118) служитъ водяной запоръ при его основанiи, черезъ который зола выгребается безъ нарушенiя работы самого генератора.

Приспособленiе *G* служитъ для засыпки угля. Дутье вводится черезъ колосниковую рѣшетку, имѣющую форму крыши. Газъ выходитъ черезъ *H*. Основанiе генератора, имѣющее форму

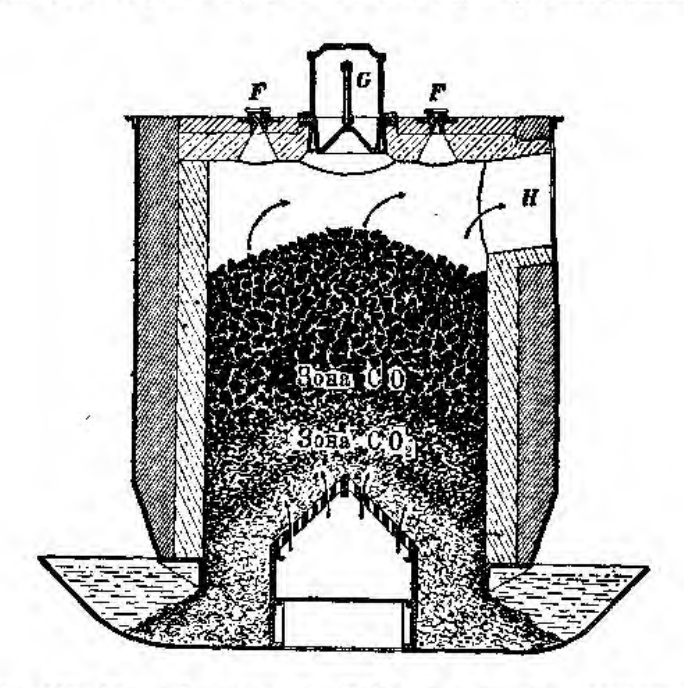


Рис. 118. Газовый генераторъ Duff'а съ водянымъ запоромъ.

сковороды, наполнено водою. Точно такъ же, какъ въ генераторѣ Taylor'а, зола образуетъ очень толстый слой, который, въ данномъ случаѣ, покоится на днѣ сковороды, кверху же простирается выше колосниковъ. На слоѣ золы лежитъ толстый слой топлива. Для наблюденiя за ходомъ горѣнiя служатъ окошечки *FF*. Горѣнiе регулируютъ 1) загрузкой и 2) распредѣленiемъ свѣжаго топлива; 3) перемѣшиванiемъ топлива сверху и

[1]) U. S. Patent, re-issue, 11,223, Jan. 29, 1896, The Duff Patents Company, 924 Carnegie Building, Pittsburgh, Pa.

4) выгребаніемъ золы въ сковороду. По мѣрѣ выгребанія золы происходитъ опусканіе топлива и золы въ генераторѣ.

Тепло золы служитъ для полученія водяного пара, который, проходя черезъ генераторъ, превращается, подъ дѣйствіемъ раскаленнаго угля, въ водяной газъ. Отверстія колосниковой рѣшетки представляютъ собою узкія щели. Онѣ настолько узки, что большая часть золы скользитъ по рѣшеткѣ на обѣ стороны, и только незначительная часть просыпается черезъ нихъ. Послѣдняя равнымъ образомъ выгребается черезъ водяной запоръ. Колосниковая рѣшетка занимаетъ почти всю ширину генератора.

Подобно генератору Taylor'a, и въ данномъ генераторѣ 1) толстый слой золы способствуетъ болѣе полному сгоранію топлива; 2) дутье вводится вблизи верхней поверхности слоя золы для уменьшенія сопротивленія; 3) горѣніе идетъ быстрѣе всего въ области, гдѣ топливо опускается, по всей вѣроятности, съ наименьшей скоростью. Безъ сомнѣнія, область наиболѣе быстраго горѣнія находится надъ колосниковой рѣшеткой, опусканіе же золы, а слѣдовательно и топлива, идетъ быстрѣе всего по сторонамъ. Такимъ образомъ, мысленная граница между горящимъ топливомъ и золой должна проходить приблизительно, какъ это изображено на рис. 118. При очень толстомъ слоѣ золы такая неравномѣрность не оказываетъ вреднаго вліянія.

330) Примѣненіе водяного пара въ генераторѣ.—Въ § 327 мы видѣли, что примѣненіе пара для введенія воздуха въ генераторъ затрудняетъ образованіе шлаковыхъ комковъ и тѣмъ самымъ одновременно облегчаетъ чистку топки и уменьшаетъ механическую потерю угля. Кромѣ того, примѣненіе пара увеличиваетъ количество горючаго газа, получающагося на тонну угля. Ибо, въ то время какъ одинъ эквивалентъ углерода, превращаясь въ генераторѣ подъ вліяніемъ атмосфернаго воздуха въ газъ, даетъ только одинъ эквивалентъ окиси углерода ($C + O = CO$), одинъ эквивалентъ углерода, превращаясь въ газъ подъ вліяніемъ пара, даетъ кромѣ того еще два эквивалента водорода ($C + H_2O = CO + 2H$). Кромѣ того, газъ, полученный при помощи воздуха, настоящій генераторный газъ, разбавленъ азотомъ, полученный же при помощи пара водяной газъ азотомъ не разбавленъ.

Разумѣется, общее количество тепла, которое можно получить изъ тонны топлива, отъ этого не измѣняется. Примѣненіе пара только вызываетъ поглощеніе тепла въ генераторѣ, которое возмѣщается въ рабочемъ пространствѣ, благодаря горѣнію добавочнаго водорода, образовавшагося за счетъ поглощеннаго тепла. Очевидно, что калорія, выдѣляющаяся непосредственно въ рабочемъ пространствѣ, болѣе дѣйствительна, чѣмъ если бы она выдѣлилась въ генераторѣ; выдѣлившись въ генераторѣ, она въ значительной степени разсѣялась бы на пути къ рабочему пространству.

Само собою разумѣется, что топливо, для того, чтобы превратиться въ газъ, должно находиться при высокой температурѣ, потому что въ противномъ случаѣ оно не могло бы реагировать ни съ воздухомъ, ни съ газомъ. При этомъ температура въ генераторѣ не должна однако превышать той, которая только необходима для реакціи между кислородомъ воздуха или паромъ и углемъ. Дѣло въ томъ, что избытокъ тепла, развивающагося въ генераторѣ, не только въ значительной мѣрѣ теряется въ то время, когда газъ идетъ въ печь, но и вреденъ въ томъ отношеніи, что онъ способствуетъ сплавленію золы. Часть избытка развивающагося въ генераторѣ тепла можно утилизировать, вводя въ послѣдній съ воздухомъ водяной паръ; при этомъ возрастаетъ количество образующагося горючаго газа, и энергія, затраченная въ генераторѣ на образованіе избытка газа, возвращается въ рабочемъ пространствѣ при горѣніи послѣдняго. Короче говоря, вводя паръ, мы вызываемъ поглощеніе тепла въ генераторѣ, гдѣ оно вредно, и получаемъ его обратно въ рабочемъ пространствѣ печи, гдѣ оно всего нужнѣе.

Въ настоящее время часто примѣняется генераторный газъ, содержащій отъ 5 до 6% углекислоты. Такое содержаніе углекислоты въ газѣ вовсе не вызываетъ потери энергіи, если вводить достаточно пара, какъ это видно изъ слѣдующаго поясненія. Температура въ генераторѣ должна быть не ниже точки воспламененія угля. Количество пара, которое можетъ быть примѣняемо, ограничено тѣмъ, что паръ не долженъ вызывать пониженія температуры ниже этой точки. Очевидно, давая части окиси углерода сгорать въ углекислоту, мы тѣмъ самымъ вызываемъ большее развитіе тепла въ генераторѣ, и этотъ избытокъ

тепла позволяетъ намъ разложить соотвѣтственно большее количество пара, при чемъ не вызывается пониженіе температуры ниже точки воспламененія угля. Такимъ образомъ, увеличеніе содержанія углекислоты въ генераторномъ газѣ не влечетъ за собою необходимо потери энергіи,—по просту вмѣсто того, чтобы часть энергіи получать въ видѣ окиси углерода, мы получаемъ ее въ видѣ водорода.

Добавленіе первое.

---

331) Дальнѣйшія замѣчанія относительно строенія сѣраго чугуна.—Принятая нами здѣсь теорія строенія чугуна основывается на понятіи объ основной массѣ и графитѣ. Поэтому чрезвычайно важно, чтобы это понятіе было возможно твердо усвоено. Для этой цѣли ниже разработанъ рядъ слѣдующихъ предположительныхъ случаевъ.

Случай 1. Предположимъ, что въ одной прочной желѣзной изложницѣ помѣщается цилиндръ изъ кварца, въ другой (рис. 119*A*)—цилиндръ изъ бѣлаго чугуна. Предположимъ далѣе, что сильнымъ ударомъ сверху мы раздробимъ этотъ цилиндръ изъ кварца и что его осколки останутся въ изложницѣ, подобно осколкамъ бѣлаго чугуна, какъ это представлено на рис. 119*B*. Затѣмъ заполнимъ щели жидкимъ асфальтомъ или портландскимъ цементомъ и дадимъ ему затвердѣть.

Въ данномъ случаѣ мы имѣемъ передъ собою конгломератъ, основною массою котораго является кварцъ, веществомъ же связывающимъ или заполняющимъ—асфальтъ или портландскій цементъ. Этотъ примѣръ даетъ намъ ясное представленіе о томъ, что мы подразумѣваемъ подъ основной массой.

332) Случай 2. Далѣе предположимъ, что кварцевый цилиндръ замѣщенъ цилиндромъ изъ бѣлаго чугуна, рис. 119*A*, и что онъ раздробленъ вышеуказаннымъ образомъ. Предположимъ затѣмъ, что неизвѣстнымъ намъ способомъ графитъ плотно забитъ въ щели между частичками желѣза (рис. *C*), и что онъ крѣпко связываетъ ихъ, подобно асфальту въ случаѣ 1. Здѣсь опять мы

	Случай 2.	Случай 3.	Случай 4.
Сплошная болванка	*A.* Болванка бѣлаго чугуна.	*D.* Болванка бѣлаго чугуна.	*G.* Болванка бѣлаго чугуна.
Раздробленная болванка.	*B.* Раздробленная болванка.	*E.* Раздробленная болванка.	$Fe_3C = 3Fe + C$.
Графитъ посторонній или выдѣлившійся.	C. Раздробленная болванка съ трещинами, заполненными постороннимъ графитомъ.	*F.* Раздробленная болванка съ выдѣлившимся графитомъ.	*H.* Сплошная болванка съ выдѣлившимся графитомъ.
Основная масса.	Бѣлый чугунъ ($C = 4\%$) { Цементитъ, Fe_3C 60%, Ферритъ, *Fe*, 40%.	Ферритъ, *Fe* = Мягкая сталь.	Ферритъ, *Fe* = Мягкая сталь.
Заполняющее вещество.	Посторонній графитъ.		
Выдѣлившееся вещество.		Выдѣлившійся графитъ.	Выдѣлившійся графитъ.
Въ общемъ.	Сѣрый чугунъ.	Сѣрый чугунъ.	Сѣрый чугунъ.

Рис. 119. Основная масса и графитъ въ сѣромъ чугунѣ.

имѣемъ конгломератъ, основною массою котораго является бѣлый чугунъ, связывающимъ же веществомъ графитъ. Такой конгломератъ въ цѣломъ можно было бы разсматривать, какъ сѣрый чугунъ. Конечно, онъ содержалъ бы больше углерода, чѣмъ въ дѣйствительности содержитъ любой чугунъ. Несмотря на то, что такое вещество содержало бы больше двухъ процентовъ углерода, оно было бы чугуномъ, и при томъ сѣрымъ, такъ какъ оно ломалось бы только вдоль по трещинамъ, заполненнымъ графитомъ, и въ изломѣ онъ одинъ только и былъ бы виденъ. Итакъ, данный конгломератъ, называемый сѣрымъ чугуномъ, состоитъ 1) изъ основной массы, образованной изъ бѣлаго чугуна, и 2) изъ заполняющаго вещества—графита.

333) Случай 3. Далѣе предположимъ, что подобный же цилиндръ изъ бѣлаго чугуна [*D*] раздробленъ [*E*] и что осколки связаны между собой [*F*] не постороннимъ графитомъ, какъ въ *C*, а графитомъ, который выдѣлился изъ осколковъ самой основной массы.

Легко видѣть, какимъ образомъ подобный графитъ можетъ образоваться. Допустимъ, что осколки бѣлаго чугуна содержатъ 4,00% углерода и 96% желѣза и что весь этотъ углеродъ, будучи въ соединеніи съ $4 \times 14 = 56\%$ желѣза, образуетъ $4 \times 15 = 60\%$ цементита. Остальные $96 - 56 = 40\%$ желѣза находятся въ свободномъ состояніи, въ видѣ феррита. Такимъ образомъ, первоначально бѣлый чугунъ состоитъ изъ 60% цементита и 40% феррита.

Предположимъ далѣе, что эти 60% цементита разлагаются и даютъ 56% свободнаго желѣза и 4,00% углерода, въ видѣ графита, согласно реакціи

34] . . . . $Fe_3C = 3\,Fe + C.$

Желѣзо, выдѣляющееся при этой реакціи, очевидно, представляетъ собою ферритъ, такъ какъ свободное желѣзо и ферритъ одно и то же. Допустимъ, что каждая частичка его останется на томъ же самомъ мѣстѣ, гдѣ она возникла, и что такимъ образомъ 56% феррита, образовавшихся при вышеуказанной реакціи, будутъ находиться бокъ-о-бокъ въ основной массѣ съ 40% первоначально присутствовавшаго феррита. Далѣе допустимъ, что возникшіе 4,00% графита какимъ либо образомъ покинутъ основную массу и, заполнивъ трещины между ея кусками, свя-

жутъ ихъ въ одну прочную массу или конгломератъ. Въ данномъ случаѣ основной массой конгломерата является ферритъ, связывающимъ же веществомъ графитъ.

Такую массу приходится признать за сѣрый чугунъ на томъ же основаніи, какъ и въ случаѣ 2.

Если бы кто-либо выдѣлилъ эти частички феррита, тщательно очистилъ ихъ отъ приставшаго къ нимъ графита и обратился къ опытному металлографу съ вопросомъ, не отвѣчаетъ ли это вещество по составу какому-либо извѣстному сорту стали, ему пришлось бы отвѣтить, что оно идентично по составу съ крайнимъ типомъ мягкой стали, идентично со сталью, не только бѣдной углеродомъ, но, можно сказать, даже не содержащей его. Будучи же одинаковымъ по составу съ самой мягкой сталью, это вещество должно быть одинаково съ нею и по физическимъ и химическимъ свойствамъ. Въ этомъ смыслѣ основную массу сѣраго чугуна можно считать равнозначущей съ самой мягкой сталью. Верхняя линія рис. 120 и представляетъ собою попытку выразить строеніе основной массы при различныхъ условіяхъ. Основная масса различныхъ чугуновъ по составу и, безъ сомнѣнія, также по физическимъ и химическимъ свойстамъ всегда идентична съ которымъ нибудь изъ членовъ ряда перлита.

334) Случай 4. Наконецъ, предположимъ, что цѣлый, не раздробленный, кусокъ бѣлаго чугуна [*G*, состоящій первоначально 1) изъ 4,00% углерода и 56% желѣза въ видѣ цементита и 2) изъ 40% феррита] подвергается нагрѣванію до области VII, рис. 68, т. е. до температуры, которая на нѣсколько градусовъ ниже его точки плавленія; при этомъ онъ становится чрезвычайно мягокъ.

Предположимъ, что происходитъ вышеуказанная реакція $Fe_3C = 3\,Fe + C$, и что, какъ и раньше, возникающіе 56% феррита соединяются съ 40% первичнаго феррита.

Предположимъ далѣе, что частички графита, которыя въ общемъ составляютъ 4,00% графита, способны слиться въ маленькія гексагональныя крупинки, имѣющія, скажемъ, 1/16 дюйма въ поперечникѣ (на рис. *H* онѣ представлены въ сильно увеличенномъ видѣ). Для того, чтобы слиться, эти частички должны раздвинуть тѣстообразную массу, внутри которой они произошли. Совершенно то же должно происходить и при кристаллизаціи любой соли,—положимъ, мѣднаго купороса,—изъ воднаго раствора.

При образованіи кристалла, отдѣльныя молекулы должны пройти конечное, иногда довольно значительное разстояніе черезъ воду, чтобы встрѣтиться съ тѣми молекулами, которыя уже вошли въ составъ растущаго кристалла. При этомъ на своемъ пути онѣ должны раздвигать воду. Ту силу, или производную тѣхъ силъ, которыя заставляютъ передвигаться и собираться молекулы, мы можемъ назвать кристаллической силой.

Возникшія такимъ путемъ маленькія крупинки графита образуютъ прожилки, проникающія черезъ всю массу металла.

Въ данномъ случаѣ, какъ и въ случаѣ 3, мы имѣемъ передъ собою конгломератъ, основная масса котораго состоитъ изъ феррита, заполняющее же вещество изъ графита, которое аналогично заполняющему веществу въ случаяхъ 2 и 3. Вся разница только въ томъ, что въ 2 и 3 случаяхъ графитъ заполняетъ ранѣе образовавшіяся трещины, въ случаѣ же 4 этихъ трещинъ ранѣе не существуетъ, а самъ графитъ, собираясь подъ давленіемъ кристаллическихъ силъ, раздвигаетъ мягкій металлъ, въ которомъ онъ возникаетъ.

Несмотря, однако, на это различіе, всѣ указанные случаи аналогичны между собой, поскольку это касается структурнаго отличія основной массы отъ заполняющаго вещества.

335) Образованіе бѣлаго и сѣраго чугуна. — §§ 331—334 посвящены выясненію фундаментальнаго представленія объ основной массѣ и заполняющемъ веществѣ. Тамъ же было указано и на превращеніе бѣлаго чугуна въ сѣрый (случай 4). При выдѣлкѣ «ковкаго чугуна» (§ 229) такое превращеніе бѣлаго чугуна въ сѣрый дѣйствительно происходитъ въ очень большомъ масштабѣ и составляетъ самую сущность этого процесса. Но на самомъ дѣлѣ продажный сѣрый чугунъ обычно получается совершенно инымъ путемъ. Онъ дѣлается не изъ бѣлаго чугуна, а является прямымъ продуктомъ затвердѣванія и охлажденія расплавленнаго чугуна.

Расплавленный чугунъ, вытекая изъ доменной печи, содержитъ въ растворѣ большое количество углерода (положимъ 4,00%). При этомъ чугунъ содержитъ обыкновенно еще и другія тѣла, изъ которыхъ главныя: кремній, фосфоръ, сѣра и марганецъ, но для упрощенія мы не будемъ обращать на нихъ вниманія и положимъ, что чугунъ состоитъ изъ 4,00% углерода, растворенныхъ въ 96% желѣза.

При затвердѣваніи и дальнѣйшемъ охлажденіи этого чугуна углеродъ, во-первыхъ можетъ выдѣлиться въ тѣстообразной массѣ металла въ видѣ листочковъ графита, какъ указано въ случаѣ 4. При этомъ получается «ультра-сѣрый» чугунъ, соотвѣтствующій лѣвой сторонѣ рис. 120. Если бы весь углеродъ выдѣлился такимъ образомъ, то желѣзо не содержало бы его вовсе и представляло бы собою ферритъ. Результатъ былъ бы тотъ же самый, что и въ случаѣ 4, т. е. получился бы конгломератъ, основная масса, котораго состоитъ изъ феррита и идентична по составу и свойствамъ съ ультра-низкоуглеродистой сталью, заполняющее же вещество изъ графита.

Во-вторыхъ, углеродъ при затвердѣваніи желѣза можетъ въ немъ остаться растворенньимъ, въ видѣ твердаго раствора — аустенита, который при охлажденіи ниже Ar_1 (линія PSP', рис. 68) распадается на ферритъ и цементитъ, Fe_3C. Тѣ же самыя разсужденія, какъ и въ случаѣ 3, приводятъ къ тому, что здѣсь ферритъ долженъ составлять 40%, цементитъ 60%. Въ цѣломъ эта масса представляетъ собою бѣлый чугунъ и соотвѣтствуетъ правой сторонѣ рис. 120.

Обыкновенно наблюдаются случаи промежуточные. Часть углерода переходитъ въ графитъ, часть—въ цементитъ. Положимъ, что 3,50% переходятъ въ графитъ, а остальные 0,5%—въ цементитъ. Этотъ случай представленъ ординатой, отвѣчающей 0,5% углерода, рис. 120 (Едва ли такое большое количество углерода можетъ перейти въ состояніе графита, если только, какъ это было пояснено въ § 190, образованію графита не способствуетъ присутствіе большого количества кремнія).

Итакъ, данный конгломератъ представляетъ собою сѣрый чугунъ, состоящій изъ заполняющаго вещества — графита, который составляетъ 3,50% всей массы, и изъ основной массы, которая по разности должна составлять $100 - 3{,}50 = 96{,}50\%$ всей массы. Основная масса содержитъ всѣ 96% желѣза и 0,5% углерода, находящагося въ состояніи цементита, что въ общемъ и составляетъ 96,50%.

Каково же строеніе этой основной массы?

Съ 0,5% углерода, находящагося въ состояніи цементита, должны быть въ соединеніи $0{,}50 \times 14 = 7\%$ желѣза (§ 153), такъ что основная масса должна содержать $0{,}50 + 7 = 7{,}50\%$ цементита (7,50% всей массы чугуна). Остающіеся $96 - 7 = 89\%$

желѣза, содержащіеся въ основной массѣ, ни съ чѣмъ не находятся въ соединеніи и потому должны представлять собою свободное желѣзо, ферритъ. Такимъ образомъ основная масса состоитъ изъ

цементита	0,50 (1 + 14) =	7,5%
феррита	96 — 7 =	89,0%
Основная масса въ общемъ составляетъ		96,5%

всей массы чугуна.

Съ другой стороны, основная масса содержитъ 0,50% связаннаго углерода. Таблица же 6 показываетъ, что такимъ строеніемъ обладаетъ и сталь средней твердости. Кромѣ того, мы знаемъ, что тотъ же составъ имѣетъ рельсовая сталь, съ тою только разницею, что послѣдняя обычно содержитъ преднамѣренно значительное количество марганца и, противно нашему желанію, нѣкоторое количество фосфора, сѣры и кремнія. Такимъ образомъ, мы можемъ сказать, что сѣрый чугунъ въ цѣломъ является конгломератомъ, состоящимъ изъ заполняющаго вещества, графита, который составляетъ 3,50% всей массы, и изъ основной массы, которая составляетъ 96,50% всей массы; и что основная масса по составу и, безъ сомнѣнія, по свойствамъ, идентична съ рельсовою сталью, содержащею 0,50% углерода, сталью, которая есть членъ перлитоваго ряда. Это указано въ верхней строчкѣ надъ рис. 120, надъ ординатой, соотвѣтствующей 0,5% углерода, а то, что чугунъ сѣрый, указано тамъ же, строчкой ниже.

Подобнымъ же образомъ мы могли бы прослѣдить образованіе и другихъ сортовъ чугуна.

336) Общая діаграмма строенія и свойствъ чугуна, содержащаго 4,00% углерода.—Рис. 120 является попыткой представить въ сжатой формѣ свойства и строеніе ряда чугуновъ, которые всѣ содержатъ 4,00% углерода, при чемъ измѣняется только распредѣленіе этого углерода между состояніями графита и цементита; кромѣ того представить строеніе и свойства основной массы чугуна и поставить ее въ параллель съ различными сортами желѣза. Во-первыхъ, на этой діаграммѣ нанесены линіи, которыя на рис. 59 служили для выраженія физическихъ свойствъ и количественнаго отношенія между ферритомъ и цементитомъ

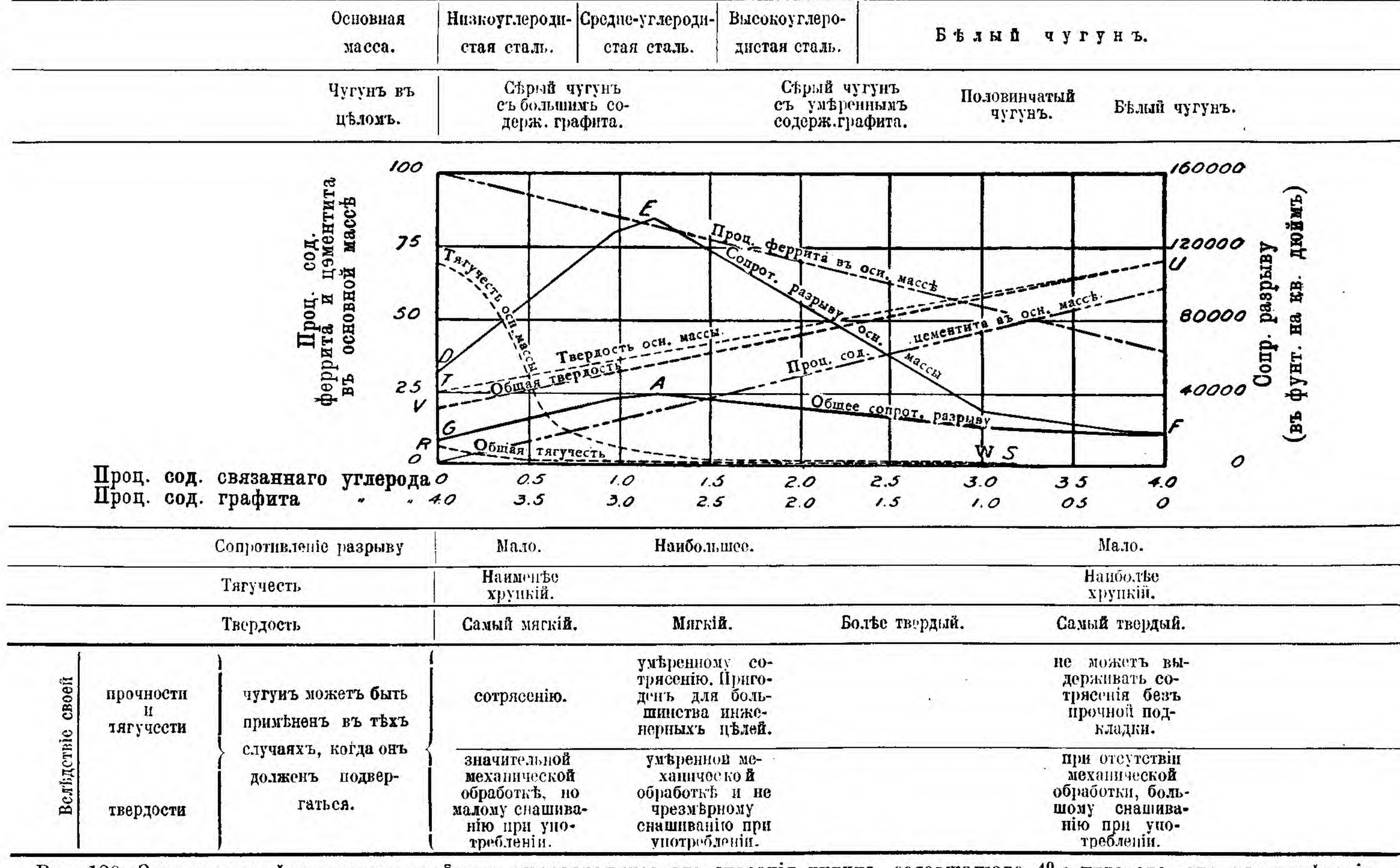


Рис. 120. Зависимость физическихъ свойствъ микроскопическаго строенія чугуна, содержащаго 4% углерода, отъ распредѣленія углерода между состояніями графита и связаннаго углерода.

въ перлитовомъ ряду. Обозначенія сохранены тѣ же, что и на рис. 59. Эти линіи должны выражать собою строеніе и свойства основной массы при различномъ въ ней содержаніи углерода, въ томъ предположеніи, что свойства ея, сопротивленіе разрыву, тягучесть, твердость и микроскопическое строеніе одинаковы со свойствами и строеніемъ стали или бѣлаго чугуна, свободныхъ отъ графита и одинаковыхъ съ нею по содержанію углерода. Напримѣръ, половинчатый чугунъ, содержащій 3% связаннаго углерода, въ видѣ цементита, и 1% въ видѣ графита можетъ быть представленъ ординатой *W*, рис. 120. Таблица 6 показываетъ намъ, что основная масса такого чугуна состоитъ изъ 55% феррита и 45% цементита и одинакова по строенію съ бѣлымъ чугуномъ перлитоваго ряда. Соотвѣтственно этому, линіи, выражающія строеніе основной массы (рис. 120), пересѣкаютъ ординату *W* при 55% и 45% («процентъ феррита въ основной массѣ» и «процентъ цементита въ основной массѣ»). Далѣе, предполагается, что свойства самой основной массы одинаковы со свойствами бѣлаго чугуна, содержащаго 55% феррита и 45% цементита. Поэтому линія, выражающая «сопротивленіе разрыву основной массы» пересѣкаетъ ординату *W* на той же высотѣ, на которой она пересѣкаетъ ординату, отвѣчающую 3% углерода на рис. 59. То же самое можно сказать и относительно линій, выражающихъ «твердость основной массы» и «тягучесть основной массы».

Итакъ, эти три линіи даютъ намъ сопротивленіе разрыву, тягучесть и твердость основной массы чугуновъ, относящихся къ тому ряду, который представленъ на рис. 120. Въ то же время, основываясь на этихъ линіяхъ, мы можемъ дѣлать извѣстное заключеніе и относительно свойства самихъ чугуновъ, если разсматривать ихъ какъ конгломераты, состоящіе 1) изъ основной массы и 2) графита. Свойства этихъ конгломератовъ, т. е. различныхъ чугуновъ представлены линіями «общее сопротивленіе разрыву», «общая твердость» и «общая тягучесть». Первая попытка такого выраженія свойствъ и строенія чугуновъ принадлежитъ автору [1]).

Въ первой строкѣ надъ діаграммой приведены названія сортовъ чугуна, во второй названія тѣхъ сортовъ стали или чу-

---

[1]) «Proc. Am. Soc. Testing Mats.», II, 1902.

гуна, которымъ по строенію соотвѣтствуетъ основная масса даннаго чугуна. Напримѣръ, въ этой строкѣ «сталь съ среднимъ содержаніемъ углерода» означаетъ, что основная масса чугуновъ подъ этимъ словами обладаетъ тѣмъ же составомъ, а слѣдовательно, согласно нашей гипотезѣ, и тѣмъ же строеніемъ, т. е. тѣмъ же процентнымъ содержаніемъ феррита и цементита, и тѣми же физическими свойствами, какъ сталь съ среднимъ содержаніемъ углерода.

Подъ діаграммой приведены свойста представленныхъ здѣсь сортовъ чугуна и тѣ примѣненія, для которыхъ они пригодны.

Добавленіе второе.

Классификація желѣза и стали съ опредѣленіями.

337) Ниже приведена классификація и опредѣленія, выработанныя входящими въ составъ Комитета международной ассоціаціи по испытанію матеріаловъ профессоромъ Albert Sauveur'омъ и авторомъ, которымъ большую помощь оказалъ своими цѣнными указаніями Mr. H. H. Campbell. Авторъ приноситъ благодарность названной ассоціаціи за разрѣшеніе воспользоваться этимъ матеріаломъ въ своемъ трудѣ[1]).

338) Опредѣленія. — *Alloy Cast Irons,* спеціальные чугуны, свойства которыхъ зависятъ главнымъ образомъ отъ присутствія элемента (или элементовъ) иного, чѣмъ углеродъ.

Alloy Steels, спеціальныя стали, свойства которыхъ зависятъ главнымъ образомъ отъ присутствія элемента (или элементовъ) иного, чѣмъ углеродъ.

Bar Iron, сварочное желѣзо въ видѣ брусковъ, полосъ и т. д.

Basic Pig Iron. Въ Америкѣ такое названіе носитъ чугунъ, содержащій мало кремнія и сѣры и пригодный для переработки на сталь при помощи основного мартеновскаго процесса. Такое

---

[1]) Въ оригиналѣ помѣщена только англійская классификація. Въ русскомъ изданіи приведены также французская, нѣмецкая и шведская классификаціи, выработанныя международной ассоціаціей, и данъ соотвѣтственный переводъ на русскій языкъ, сдѣланный по указаніямъ профессора С.-Петербургскаго политехническаго института М. А. Павлова.

Прим. перев.

Классификація.

НАЗВАНІЕ.					ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНІЯ ОБЫЧНО СЛУЖИТЪ.				
Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.	Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.
Cast iron.	Fonte.	Roheisen, не переплавленный, Gusseisen, переплавленный.	Gjutjern.	Чугунъ.	Blast furnace.	Haut fourneau.	Hochofen.	Masugn.	Доменная печь.
White cast iron или pig iron.	Fonte blanche.	Weisses Roheisen.	Hvitt tackjern.	Бѣлый чугунъ.	»	»	»	»	»
Gray cast iron или pig iron.	Fonte grise.	Graues Roheisen.	Gratt tackjern.	Сѣрый чугунъ.	»	»	»	»	»
Mottled cast iron или pig iron.	Fonte truité.	—	Hagel statt или halfhwitt или halfgratt tackjern.	Половинчатый чугунъ.	»	»	»	»	»
Pig iron (white, gray, mottled etc.).	Gueses de fonte или fonte en gueses.	Gusseisen.	Tackjern.	Чугунъ въ чушкахъ или свинкахъ.	»	»	»	»	»
Hot metal или direct matal.	Fonte de première fusion?	Remeisen.	Direct gjutet fran Masugnen.	Чугунъ въ жидкомъ состояніи.	»	»	»	»	»
Basic cast iron или pig iron.	—	—	—	Чугунъ, передѣлав. основными процессами, мартен. и бессем.	»	»	»	»	»
Hematite cast iron или pig iron.	—	—	—	Гематитъ или малофосфористый чугунъ. (Литейный и бессемеровскій).	»	»	»	»	»
Malleable pig iron.	—	—	—	Чугунъ для отливки издѣлій изъ ковкаго чугуна.	»	»	»	»	»

НАЗВАНІЕ.				
Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.
Washed metal.	Fonte épurée.	—	Tvattad.	Рафинированный чугунъ.
Refined cast iron или plate iron.	Fonte mazée.	—	Raffineradt-jern.	Рафинированный чугунъ.
Charcoal hearth cast iron.	Fonte mazée.	Herdfrischeisen.	—	Кричный чугунъ.
Alloy cast iron.	Fonte spéciale.	—	Special tack-jern.	Спеціальный чугунъ.
Malleable castings.	Fonte malléable.	Schmiedbares Gusseisen или Schmiedbarer Guss.	Aduceradtjern.	Отливки изъ ковкаго чугуна.
Steel.	Acier.	Stahl.	Stal.	Сталь.
Soft или low-carbon steel или ingot iron.	Acier doux, extra doux, fer fondu.	Flusseisen.	Gottmetal.	Литое желѣзо.
Half-hard и hard, или medium—и high-carbon steel, или ingot iron.	Acier fondu, acier mi-dur, acier dur.	Flussstahl.	—	Литая сталь полутвердая, твердая, высокоуглеродистая.
Bessemer steel.	Acier Bessemer.	Bessemer Flusseisen, Bessemer Flussstahl.	Bessemer stal.	Бессемеровская сталь.
Open-hearth steel.	Acier Martin-Siemens, acier sur sole.	Flammofen Flusseisen, Flammofen Flussstahl.	Martin stal.	Мартеновская сталь.

ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНІЯ ОБЫЧНО СЛУЖИТЪ.				
Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.
Pernot fernace.	Four Pernot.	—	Pernot's ugn.	Печь Pernot.
Coke refinery.	Four de finerie anglais.	Feinherd или Feinofen.	Koks raffineringsverk.	Горнъ для рафинированія чугуна на коксѣ.
Charcoal hearth.	—	Frischherd.	Fräkolsherd.	Кричный горнъ.
Blast furnace, crucible, electric furnace.	Haut fourneau, four à creusets, four éléctrique.	—	Masugn, Elektriskugn.	Доменная печь, тигельная, электрическая.
Airfurnace, open hearth furnace, или Cupola furnace и затѣмъ продолжительный отжигъ.	Four à réverbère Siemens, Cubilot.	—	Reverberugn, Martinsugn или Kupolugn.	Отражательная плавильная печь, Мартеновская печь, вагранка.
Bessemer converter, open-hearth furnace, crucible furnace.	Convertisseur Bessemer, four Siemens, four à creusets.	Bessemer Birne, Flusseisen Flammofen, Tiegelofen.	Bessemer converter, Martinsugn, degelstalsugn.	Бессемеровскій конвертеръ, Мартеновская печь, тигельная печь.
»	»	»	»	»
»	»	»	»	»
Bessemer Converter.	Convertisseur Bessemer.	Bessemer Birne.	Bessemer converter.	Бессемеровскій конвертеръ.
Open hearth furnace.	Four Siemens.	Flammofen (Martin или Siemensofen).	Martinsugn.	Мартеновская печь.

НАЗВАНІЕ.				
Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.
Crucible steel или cast steel.	Acier au creuset.	Tiegelflusseisen. Tiegelflussstahl.	Degelstal, Degelgjutstal.	Тигельная сталь.
Cast steel.	Acier au creuset.	Gussstahl.	Gjutstal.	Литая сталь.
Steel castings.	Moulages d'acier.	Flusswaren.	Stalgjutsgods.	Стальныя отливки.
Weld steel или wrought steel.	Fer fort или Fer dur.	Schweissstahl или Schweisseisen.	Wäll stal, рѣдко примѣняется.	Сварочная сталь.
Blister steel.	Acier poule, acier cémenté, acier de cémentation.	—	Blas stal, Bräunstal, Cementstal.	Цементная сталь (томленка—на Уралѣ).
Puddled steel.	Acier puddlé.	Puddelstahl.	Puddelstal.	Пудлинговая сталь (сварочная).
Alloy steels.	Aciers speciaux, alliages à base de fer.	Sonderstahl.	Specialstal.	Спеціальныя стали.
Wrought iron (weld iron или въ Англіи malleable iron).	Fer soudé.	Schmiedeeisen и Stabeisen.	Smides jern. Lancashire jern.	Сварочное желѣзо.
Puddled iron.	Fer puddlé.	Puddeleisen.	Puddeljern.	Пудлинговое желѣзо.
Bloomary или knobbled iron.	Fer au bois.	—	Lancashire, Franche-Comté, Walloon jern.	Куски сварочнаго желѣза.

ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНІЯ ОБЫЧНО СЛУЖИТЪ.				
Англійская.	Французская.	Нѣмецкая.	Шведская.	Русская.
Crucible furnace.	Four à creusets.	Tiegelofen.	Degelstalsugn.	Тигельная печь или горнъ.
»	»	»	»	»
»	»	»	»	»
»	»	»	»	»
Cementation furnace.	Four de cémentation.	—	Braunstalsugn.	Печь для цементаціи.
Puddling furnace.	Four à puddler.	Puddelofen.	Puddelugn.	Пудлинговая печь.
Open-hearth furnace, crucible furnace, Bessemer converter.	Four Siemens, fous à creusets, convertisseur Bessemer.	—	Martinsugn, degelstalsugn, Bessemer converter.	Мартеновская печь, тигельная печь, бессемеровскій конвертеръ.
Puddling furnace.	Four à puddler.	—	Puddelugn.	Пудлинговая печь.
»	»	—	»	»
Bloomary, назыв. также low-hearth, Lancashire hearth, knobbling fire и т. д.	Bas Foyer, Feu d'affinerie.	—	Lancaschire härd, Franche Comte härd, Walloon härd.	Сыродутный горнъ.

названіе прилагается только къ чугуну, содержащему не болѣе 1°/o кремнія.

Bessemer Pig Iron, бессемеровскій чугунъ,—чугунъ, содержащій настолько мало фосфора и сѣры, что онъ можетъ служить для переработки на сталь при помощи кислаго бессемеровскаго процесса. Въ Америкѣ такое названіе прилагается только къ чугуну, содержащему не болѣе 0,10°/o фосфора.

Bessemer Steel, бессемеровская сталь,—сталь, полученная по бессемеровскому способу, независимо отъ содержанія углерода.

Billet, небольшой брусокъ, полученный изъ bloom (см. ниже) или изъ болванки, и служащій для дальнѣйшей обработки. Комитетъ рекомендуетъ считать границею между billet и bloom 5 кв. дюймовъ поперечнаго сѣченія, какъ это принято на практикѣ.

Blister Steel, цементная сталь,—сталь, получаемая науглероживаніемъ сварочнаго желѣза путемъ нагрѣванія его въ соприкосновеніи съ углеродистыми веществами. Можетъ быть получена также науглероживаніемъ низкоуглеродистой стали.

Bloom, 1) Большой брусокъ полученный изъ болванки и служащій для дальнѣйшей обработки. 2) Необработанный брусокъ, полученный изъ крицы и служащій для дальнѣйшей обработки.

Cast Iron, чугунъ. Вообще желѣзо, содержащее такое количество углерода или эквивалентнаго ему вещества, что оно не обладаетъ ковкостью ни при какой температурѣ. Въ частности, чугунъ въ видѣ отливокъ, а не въ видѣ свинокъ, или расплавленный чугунъ для отливокъ. По-англійски на торговомъ языкѣ чугунъ носитъ названіе «cast iron», когда онъ въ видѣ отливокъ, и «pig iron», когда онъ въ видѣ свинокъ.

Комитетъ рекомендуетъ считать за границу между чугуномъ и сталью 2,20°/o углерода, такъ какъ, повидимому, на основаніи результатовъ, полученныхъ Carpenter'омъ и Keeling'омъ, 2,2°/o углерода отвѣчаютъ точкѣ «a» на діаграммѣ Roberts-Austen'a и Roozeboom'a. Что касается до значенія этой критической точки, то Комитетъ воздерживается высказать свое мнѣніе.

Cast Steel то же, что crucible steel, литая или тигельная сталь.

Cemented Steel, цементная сталь, то же, что blister steel.

Charcoal Hearth Cast Iron, чугунъ, изъ котораго кремній и, обычно, фосфоръ удалены путемъ обработки въ кричномъ горну, но который содержитъ еще достаточно углерода, чтобы считаться чугуномъ.

Converted Steel тоже, что blister steel.

Crucible Steel, тигельная сталь,—сталь, полученная при помощи тигельнаго процесса, независимо отъ содержанія углерода.

Gray Pig Iron и *Gray Cast Iron,* сѣрый чугунъ, — чугунъ, частички желѣза котораго въ изломѣ совершенно или отчасти прикрыты графитомъ, и который въ изломѣ вслѣдствіе этого обладаетъ сѣрымъ цвѣтомъ.

Hematite Pig iron. Первоначально такъ назывался чугунъ, который получали изъ гематитовыхъ рудъ въ Англіи. Эти руды содержатъ такъ мало фосфора и сѣры, что чугунъ, выплавляемый изъ нихъ, можетъ служить непосредственно для переработки по кислому бессемеровскому способу. Затѣмъ, по ассоціаціи, это названіе стали прилагать ко всякому чугуну, почти не содержащему фосфора и сѣры. Этотъ терминъ не примѣняется въ Америкѣ и нежелателенъ.

Hot Metal или *Direct Metal,* расплавленный чугунъ, который еще не успѣлъ застыть по выпускѣ изъ доменной печи.

Ingot Iron, литое желѣзо. Сталь, отлитая въ ковкую массу и содержащая такъ мало углерода или эквивалентнаго ему вещества, что она не принимаетъ значительной закалки при быстромъ охлажденіи. Этимъ названіемъ рѣдко пользуются въ англійскомъ языкѣ. Обыкновенно этотъ сортъ стали называютъ «mild steel» или «low carbon steel» или «soft steel» (мягкая или низкоуглеродистая сталь). Въ Америкѣ границею между мягкой сталью и сталью средней твердости служатъ 0,20% углерода.

Ingot Steel, литая сталь. Сталь, отлитая въ ковкую массу и содержащая настолько углерода или эквивалентнаго ему вещества, что она принимаетъ сильную закалку при быстромъ охлажденіи. Этимъ названіемъ рѣдко пользуются въ англійскомъ языкѣ. Обыкновенно этотъ сортъ стали называютъ «hard steel», «high-carbon steel» или «half-hard steel» (твердая сталь, высокоуглеродистая сталь или сталь средней твердости).

Malleable castings, отливки изъ ковкаго чргуна.

Malleable Cast iron, ковкій чугунъ. Чугунъ, которому придается ковкость путемъ дальнѣйшей обработки, безъ переплавленія.

Въ сущности, ковкій чугунъ не есть разновидность чугуна, а представляетъ собою особнякомъ стоящій желѣзный продуктъ, такъ какъ онъ не обладаетъ существеннымъ свойствомъ чугуна —

чрезвычайной хрупкостью. Терминъ «malleable castings» очень обыченъ, терминъ же «malleable cast iron» примѣняется рѣдко. Къ сожалѣнію, совершенно непростительно пользуются терминомъ «malleable», который произносится, какъ «mallable» и примѣняется, какъ существительное.

Malleable Iron, ковкое желѣзо, то же, что wrought iron, сварочное желѣзо. Терминъ, примѣняемый въ Англіи, но не въ Соед. Штатахъ, гдѣ онъ по небрежности служитъ иногда для обозначенія ковкаго чугуна.

Malleable Pig Iron, американское торговое названіе чугуна, служащаго для переработки на ковкія отливки. Въ Америкѣ этотъ продуктъ называютъ также «malleable iron», ковкое желѣзо; неудачный терминъ, такъ какъ «malleable iron» въ Англіи обозначаетъ сварочное желѣзо и является давно и твердо установившимся терминомъ.

Mottled Pig Iron и *Mottled Cast Iron*, половинчатый, третной чугунъ,—чугунъ, обладающій пестрымъ строеніемъ; одни участки его бѣлаго цвѣта и лишены графита, другіе—сѣраго и содержатъ графитъ.

Muck Bar, бруски, обычно толщиною въ 1 дюймъ и шириною въ 4 дюйма. Получается при первой прокаткѣ пудлинговой крицы.

Open-Hearth Steel, мартеновская сталь, независимо отъ содержанія углерода.

Pig Iron, чугунъ, отлитый въ свинки при выпускѣ изъ доменной печи. Это названіе прилагается также къ расплавленному чугуну, который долженъ или можетъ быть отлитъ въ свинки.

Plate Iron. Такъ называется въ Англіи рафинированный чугунъ.

Puddled Iron, пудлинговое желѣзо,—сварочное желѣзо, полученное по пудлинговому способу.

Puddled Steel, пудлинговая (сварочная) сталь,—сталь, изготовленная по пудлинговому способу и по необходимости содержащая шлакъ (см. Weld Steel).

Refined Cast Iron, рафинированный чугунъ,—чугунъ, большая часть кремнія котораго удалена при обработкѣ въ рафинировочной печи, но который содержитъ еще достаточно углерода, чтобы считаться чугуномъ.

Steel сталь,—желѣзо, которое ковко по крайней мѣрѣ въ одномъ температурномъ интервалѣ и кромѣ того или а) отлито въ ковкую массу, или b) способно принимать сильную закалку при быстромъ охлажденіи, или с) и отлито такимъ образомъ и способно принимать закалку.

Steel Cast (прилагательное)—издѣліе изъ твердой бессемеровской, мартеновской, тигельной или другой, не содержащей шлака, стали, не прокатанное и не прокованное. Прилагается къ стальнымъ отливкамъ. Напримѣръ, «steel cast», въ приложеніи къ орудію, обозначаетъ отлитое изъ стали орудіе, которое не было подвергнуто прокаткѣ или проковкѣ. Тогда какъ «cast steel», въ приложеніи къ орудію, обозначаетъ, что орудіе сдѣлано изъ тигельной стали.

Steel Castings, стальныя отливки,—непрокованныя и непрокатанныя отливки изъ бессемеровской, мартеновской, тигельной или другой стали. Болванки и свинки также въ извѣстномъ смыслѣ представляютъ собою отливки. Терминъ «Steel Castings» примѣняется болѣе узко и приложимъ только къ спеціальной формы отливкамъ, идущимъ въ дѣло безъ прокатки или проковки. Впослѣдствіи отливки могутъ подвергнуться проковкѣ и тогда онѣ называются поковками. Если отливки проковываются только частью, тогда они частью являются поковками, частью отливками.

Slab, плоская болванка или листъ, вырѣзанный или прокатанный изъ болванки и служащій для дальнѣйшей обработки.

Washed Metal, чугунъ, большая часть кремнія и фосфора котораго удалены при помощи процесса Bell-Krupp'а, но который содержитъ еще достаточно углерода, чтобы считаться чугуномъ. Названіе «Washed metal» прилагается даже и въ томъ случаѣ, когда содержаніе углерода нѣсколько меньше, чѣмъ это соотвѣтствуетъ чугуну.

Weld Iron, то же, что Wrought iron.

Weld Steel, сварочная сталь,—желѣзо, соддержащее достаточно углерода для того, чтобы принимать закалку при быстромъ охлажденіи, и кромѣ того содержащее шлакъ, такъ какъ получается свариваніемъ тѣстообразныхъ частичекъ металла, окруженныхъ шлакомъ, какъ при пудлингованіи. Не освобожденное отъ шлака путемъ переплавленія. Рѣдко примѣняемый терминъ.

White Pig Iron и *White Cast Iron*, бѣлый чугунъ,—чугунъ, въ изломѣ не обнаруживающій графита; изломъ его, поэтому, бѣлый, серебристый.

Wrought Iron, сварочное желѣзо,—желѣзо, содержащее шлакъ, ковкое и не принимающее замѣтной закалки при быстромъ охлажденіи.

Wrought Steel—то же,что weld steel. Терминъ рѣдко примѣняется.

339) Граница между сталью и желѣзомъ. — Было бы полезно принять извѣстное содержаніе углерода за границу между пудлинговымъ желѣзомъ и пудлинговой сталью и между другими разновидностями сварочнаго желѣза и сварочной стали. Здѣсь возможенъ двоякій путь. Съ одной стороны за границу можно принять 0,32% углерода или эквивалентное количество другого элемента, такъ какъ 0,32% углерода, повидимому, отвѣчаютъ критической точкѣ *H* на діаграммѣ Roberts-Austen'а и Roosebоom'а. Данная граница имѣетъ то преимущество, что она совпадаетъ съ опредѣленной физической границей.

Съ другой стороны, за границу можно принять 0,20% углерода, такъ какъ здѣсь мы имѣемъ удобную линію раздѣла между двумя важными классами — между «мягкой сталью» и между «сталью средней твердости». Если принять за границу 0,20% углерода, то «литое желѣзо» будетъ синонимомъ «мягкой стали», а «литая сталь» соотвѣтствовала бы двумъ классамъ — «стали средней твердости» и «твердой стали».

Добавленіе третье.

340) Магнитныя свойства [1]).—Какъ уже было указано въ § 194, альфа-желѣзо стойкое ниже A_2 (рис. 68), и характеризующее собою медленно охлажденное желѣзо и сталь, обладаетъ сильно выраженными магнитными свойствами; бэта- же и гамма-желѣзо, изъ которыхъ первое стойко между A_2 и A_3, а второе выше A_3, обладаютъ очень слабыми магнитными свойствами. Изъ альфа-желѣза въ свою очередь, повидимому, рѣзче всего выражены магнитныя свойства у альфа-феррита. По мѣрѣ уменьшенія содержанія углерода временный магнетизмъ увеличивается, постоянный же магнетизмъ, ретентивность, уменьшается; такимъ образомъ у очень низкоуглеродистой стали и у сварочнаго желѣза временный магнетизмъ очень великъ, постоянный же очень малъ. Это явленіе можно объяснить тѣмъ, что временный магнетизмъ вызывается вращеніемъ полярныхъ частичекъ альфа-желѣза подъ вліяніемъ намагничивающей силы, постоянный же — закрѣпленіемъ этихъ частичекъ по вращеніи. Въ очень низкоуглеродистой стали, почти нацѣло состоящей изъ альфа-феррита, частички его безпрепятственно могутъ вращаться подъ вліяніемъ намагничивающей силы; этимъ и объясняется большой временный магнетизмъ низкоуглеродистой стали. Но, съ другой стороны, ничто не препятствуетъ этимъ частич-

[1]) См. Osmond, «Philosophical Magasine», 5-ая серія, т. XXIX, стр. 511, іюнь, 1890. Также, авторъ, «Tran. American Inst. Mining Engineers», XXVII, 1897, стр. 914.

камъ принять прежнее положеніе послѣ того, какъ намагничивающая сила перестанетъ оказывать свое вліяніе; отсюда ясна малая ретентивность низкоуглеродистой стали.

Такая сталь, почти свободная отъ углерода, оказывающаго задерживающее вліяніе на превращеніе, даже будучи закалена въ области аустенита, IV рис. 68, переходитъ въ ферритъ и цементитъ почти такъ же, какъ при медленномъ охлажденіи. Вслѣдствіе этого у низкоуглеродистой стали, не принимающей закалки, при быстромъ охлажденіи не возникаетъ способности къ пріобрѣтенію постояннаго магнетизма, но въ то же время и не утрачивается способность ко временному намагничиванію.

Высокоуглеродистая сталь, напротивъ, даже будучи медленно охлаждена, обладаетъ небольшою способностью къ пріобрѣтенію временнаго магнетизма. Во-первыхъ, потому, что она содержитъ гораздо меньше альфа-феррита, во-вторыхъ, главнымъ образомъ, потому, что вращеніе частичекъ альфа-феррита, быть можетъ, отчасти испытываетъ препятствіе со стороны цементита и, вѣроятно, въ еще большей степени со стороны бэта или гамма-желѣза, которые подъ вліяніемъ углерода не могли перейти въ альфа-желѣзо, несмотря на всю медленность охлажденія.

Съ другой стороны, высокоуглеродистая сталь при очень быстромъ охлажденіи пріобрѣтаетъ большую ретентивность. Дѣло въ томъ, что разъ произошло вращеніе частичекъ альфа-желѣза, бэта- или гамма-желѣзо удерживаютъ ихъ въ этомъ положеніи послѣ прекращенія дѣйствія намагничивающей силы. Бэта- же или гамма-желѣзо присутствуютъ въ стали потому, что подъ вліяніемъ очень быстраго охлажденія они не успѣваютъ перейти въ альфа-желѣзо.

Добавленіе четвертое.

Новости въ области металлургіи.

341) Качающаяся пудлинговая печь Roe (Roe's Rocking Puddling Furnace)[1].—Эта печь представлена на рис. 121. Она состоитъ изъ пудлинговой камеры, снабженной сходящимися, въ видѣ квадрантовъ, дымоходами, которая можетъ качаться взадъ и впередъ на 65 градусовъ въ направленіи, указанномъ стрѣлками *G G*, вокругъ пустыхъ цапфъ *B*. Черезъ послѣднія происходитъ нагрѣваніе ея нефтью. Скорость качанія измѣняютъ по мѣрѣ надобности въ различныхъ стадіяхъ пудлинговаго процесса. Качаніе ускоряетъ окисленіе и удаленіе углерода, кремнія и т. д. тѣмъ, что вызываетъ повторное перемѣшиваніе сильно окислительнаго шлака и металла, заставляя ихъ скатываться то вправо, то влѣво. Подъ конецъ, возникающая тѣстообразная масса желѣза скатывается въ одинъ большой комокъ, вѣсомъ до 4.000 фунтовъ. Этотъ комокъ затѣмъ поступаетъ подъ прессъ, при помощи котораго изъ него, подъ давленіемъ около 1.800 тоннъ, выдавливается шлакъ. Послѣ этого изъ него тотчасъ выкатываются заготовки (billets) или даже, какъ сообщаютъ, готовые полосы. Пудлинговое пространство покрыто очень медленно снашивающимися магнезитными кирпичами *A*, покоющимися на желѣзномъ днѣ, охлаждаемомъ водой.

Въ печь для обработки поступаетъ расплавленный чугунъ, по возможности, прямо изъ доменной печи. Въ качествѣ окисли-

---

[1]) «Trans. Am. Inst. Mining Engineers», XXXIII, стр. 551—561, 1903.

теля примѣняется окалина, окись желѣза, отпадающая съ поверхности стали или желѣза при прокаткѣ. Конечно, дѣйствіе ея усиливается кромѣ того кислородомъ воздуха. Помимо ока-

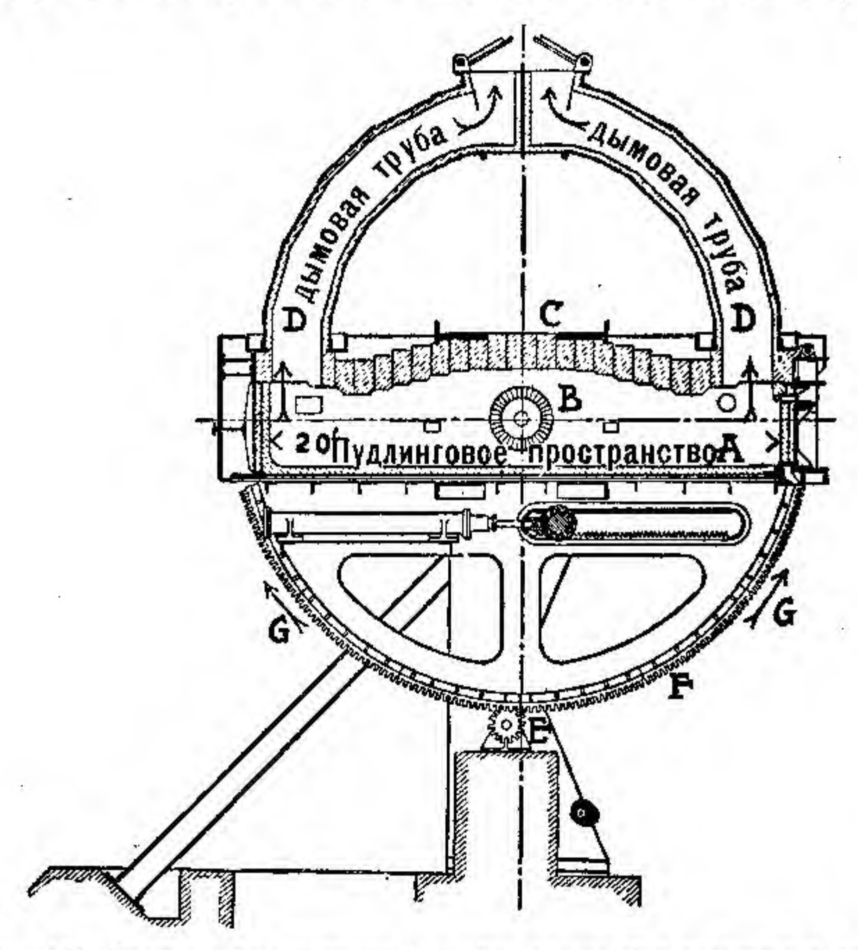


Рис. 121. Продольный вертикальный разрѣзъ качающейся пудлинговой печи Roe (Roe's Rocking Puddling Furnace).

A—пудлинговое пространство, длиною около 20 ф. и шириною 8 ф., выложенное магнезитными кирпичами. *B*—полая цапфа, вокругъ которой происходитъ качаніе печи. Съ противуположной стороны находится вторая цапфа, ось которой совпаетъ съ осью указанной здѣсь цапфы. Черезъ эти цапфы происходитъ отопленіе печи нефтью,—единственнымъ, въ данномъ случаѣ, источникомъ тепла. *C*—огнеупорные кирпичи, составляющіе сводъ пудлинговой камеры. *DD*—сходящіяся дымовыя трубы, качающіяся вмѣстѣ съ печью. *E*—зубчатое колесо, служащее для качанія печи, при помощи рейки *F*. *GG*—стрѣлки, указывающія направленіе, въ которомъ происходитъ качаніе печи.

лины къ массѣ прибавляютъ еще извѣстное количество сильно основного силиката желѣза.

Roe утверждаетъ, что примѣненіе его печи сильно понижаетъ стоимость пудлинговаго процесса, въ силу слѣдующихъ причинъ:

1) его печь даетъ возможность избѣгать очень трудной, а поэтому и дорогой работы ручного пудлингованія; 2) въ его печи можно подвергать обработкѣ гораздо большія загрузки, до 4.000 фунтовъ, тогда какъ обычная загрузка двойной ручной печи составляетъ 1.100 фунтовъ; 3) крицы, получающіяся въ его печи, также гораздо больше, до 4.000 фунтовъ, тогда какъ при ручной обработкѣ онѣ обычно достигаютъ 180 фунтовъ; 4) сильно уменьшаются потери желѣза вслѣдствіе окисленія, такъ какъ, благодаря большему объему крицъ, при прессованіи, подогрѣваніи и прокаткѣ подвергается окислительному дѣйствію воздуха соотвѣтственно меньшая поверхность. Наибольшую невыгоду составляетъ большая стоимость установки этой печи.

Мы въ правѣ задаться вопросомъ, почему можно разсчитывать на успѣхъ этой печи, когда столько прежнихъ механическихъ пудлинговыхъ печей, включая сюда печи Danks и Pernot, отъ которыхъ такъ много ожидали, оказались непригодными.

Передъ прежними пудлинговыми печами были открыты двѣ области. Первая изъ нихъ, это переработка фосфористаго чугуна въ свободное отъ фосфора пудлинговое желѣзо, которое представляетъ собою хорошій матеріалъ для выдѣлки стали при помощи кислаго мартеновскаго процесса. До изобрѣтенія основного бессемеровскаго и основного мартеновскаго процессовъ фосфористый чугунъ не годился для непосредственной выдѣлки стали. Вторая область, это выдѣлка сварочнаго желѣза, примѣняемаго какъ таковое, послѣ прокатки въ листы или полосы.

Первая изъ этихъ областей уже давно закрыта, потому что основной мартеновскій процессъ представляетъ собою гораздо болѣе дешевый путь для переработки фосфористаго чугуна прямо въ сталь.

Во второй области прежнія механическія пудлинговыя печи оказывались безуспѣшны, потому что давали слишкомъ неоднородный продуктъ. Различныя части одной и той же полосы или листа слишкомъ отличались по свойствамъ и составу. Это вызывалось, во-первыхъ, тѣмъ, что крицы получались съ непереработанной центральной частью; во-вторыхъ, тѣмъ, что облицовка печи крошилась и неизбѣжно смѣшивалась съ массою металла; въ-третьихъ, тѣмъ, что недостаточно выдавливался шлакъ, въ которомъ образовывалась крица. Всѣхъ этихъ трехъ

недостатковъ Roe полагаетъ избѣгнуть, какъ я ниже постараюсь показать.

Изученіе недостатковъ многихъ вышедшихъ изъ употребленія механическихъ пудлинговыхъ печей завело бы насъ слишкомъ далеко. Мы остановимся только на печахъ Danks и Pernot, для того, чтобы показать, какимъ образомъ Roe надѣется избѣжать тѣхъ недостатковъ, которые свойственны названнымъ печамъ.

Пудлинговая печь Danks представляла собою подобіе бочки, лежащей на боку и вращающейся вокругъ своей оси. Пудлинговая печь Pernot имѣла форму блюда, наклоненнаго на нѣсколько градусовъ и равнымъ образомъ вращающагося вокругъ своей оси. При вращеніи печи все время свѣжая поверхность расплавленнаго чугуна приводилась въ соприкосновеніе съ окислительнымъ шлакомъ, богатымъ окисью желѣза. При этомъ происходило смѣшиваніе чугуна и шлака, и такимъ путемъ шло окисленіе углерода, кремнія и фосфора подъ вліяніемъ окиси желѣза. Все шло хорошо, пока чугунъ оставался расплавленнымъ. Но какъ только, подъ вліяніемъ потери углерода, часть чугуна переставала быть жидкой, становилась тѣстообразной и сбивалась въ комки, начинались затрудненія. При неподвижномъ положеніи печи, шлакъ дѣйствовалъ бы только на поверхность чугуна и продуктъ получался бы очень неоднородный. Поэтому необходимо было все время приводить печь во вращеніе, для того чтобы поддерживать окисленіе. Но и это не помогало, такъ какъ тѣстообразныя частички сбивались въ комки, внутренняя часть которыхъ не могла подвергаться дальнѣйшему окисленію, будучи защищена отъ него внѣшними слоями. Когда желѣзо начинаетъ сбиваться въ комки, оно еще далеко отъ полнаго очищенія и представляетъ собою сравнительно сырой продуктъ. Поэтому крицы получались съ не вполнѣ переработанной внутренней частью, и этому нельзя уже было помочь никакой дальнѣйшей обработкой. Непереработанная часть крицы входила въ составъ получающихся при прокаткѣ изъ нея полосъ или листовъ.

Печь Roe не имѣетъ перваго изъ указанныхъ недостатковъ, такъ какъ желѣзо, начиная переходить въ тѣстообразное состояніе, покрываетъ плоскій подъ ея въ видѣ тонкаго слоя и, благодаря этому, подвергается почти равномѣрно дѣйствію шлака.

При качаніи печи, желѣзо, становясь все гуще, скорѣе скользитъ по поду, а не катается, какъ въ печи Danks или Pernot. Благодаря этому, гораздо меньше происходитъ обволакиваніе непереработанныхъ частей желѣзомъ, недопускающимъ дальнѣйшаго окисленія ихъ подъ вліяніемъ расплавленнаго шлака.

Второе затрудненіе, заключавшееся въ томъ, что куски футеровки отламывались и смѣшивались съ пудлингованнымъ желѣзомъ, Roe обошелъ также безъ труда. Онъ замѣнилъ желѣзную руду, служившую футеровкой въ прежнихъ печахъ, магнезитными кирпичами, которые подъ вліяніемъ прогресса, наблюдаемаго въ процессахъ изготовленія стали, достигли высокой степени совершенства. Эти кирпичи очень крѣпки, гладки и плотны. По заслуживающимъ довѣрія свѣдѣніямъ, они не крошатся, а только очень медленно снашиваются. Вторымъ усовершенствованіемъ, такимъ образомъ, Roe обязанъ прогрессу въ процессахъ выдѣлки стали.

Третье затрудненіе заключалось въ томъ, что не удавалось достаточно хорошо выжать шлакъ изъ большой крицы; крица же почти необходимо получается большого размѣра, какова бы ни была печь—качающаяся или вращающаяся. Roe обходитъ очень смѣло это затрудненіе такимъ образомъ, что крица изъ печи прямо поступаетъ подъ передвижной прессъ, а не въ центральный прессъ, который можетъ находиться на значительномъ разстояніи отъ крайнихъ печей. При этомъ избѣгается рискъ, что крица можетъ остыть по пути къ прессу или ожидая своей очереди у него. Прессъ этотъ, отличающійся огромной силой, передвигается отъ одной пудлинговой печи къ другой и подъ него непосредственно изъ печи поступаютъ большія, до 4.000 фунтовъ, крицы.

При этомъ получается настолько однородная и свободная отъ шлака крица, что, по мнѣнію Roe, ее можно прямо прокатывать въ полосы или листы. Крицы же, получающіяся при ручномъ пудлингованіи, должны передъ тѣмъ подвергнуться особой обработкѣ, состоящей въ томъ, что ихъ прокатываютъ въ полосы, которыя разрѣзаются, складываются въ пакеты, провариваются и затѣмъ уже вновь прокатываются.

Итакъ, главныя преимущества печи Roe предъ прежними механическими пудлинговыми печами слѣдующія:

1) Крицы получаются безъ сырой внутренней части, благодаря тому, что обрабатываемая масса покрываетъ плоскій подъ тонкимъ, почти ровнымъ слоемъ до тѣхъ поръ, пока она не будетъ готова для скатыванія въ комки и для выжиманія; тѣстообразная масса скользитъ, а не катится по поду.

2) Футеровка гладкая и плотная, не крошится и не загрязняетъ получающагося продукта.

3) Благодаря очень сильному прессу, а также тому, что крица поступаетъ подъ него прямо изъ печи при полномъ нагрѣвѣ, шлакъ удаляется настолько полно, что раскаленная крица можетъ тотчасъ прокатываться въ полосы или листы.

342) Газовый генераторъ Mond'a. — Газовый генераторъ Mond'a, изображенный на рис. 122, представляетъ собою видоизмѣненіе и дальнѣйшею усовершенствованіе обычнаго газоваго генератора съ водянымъ запоромъ и съ продуваніемъ водяного пара [1]).

Въ этомъ генераторѣ точно также получается смѣсь углеводородовъ, происходящая при дистилляціи свѣже-загруженнаго угля на верху, и окись углерода, водородъ и азотъ, происходящіе при горѣніи угля подъ вліяніемъ воздуха и пара въ нижней части. Генераторъ Mond'a имѣетъ цѣлью полученіе газа съ возможно большимъ содержаніемъ амміака, NH_3. Это достигается пониженіемъ температуры и повышеніемъ въ газѣ пропорціи водорода, путемъ введенія съ воздухомъ возможно большого количества паровъ воды, а также другихъ пріемовъ. Водяной паръ, съ одной стороны, понижаетъ температуру, вслѣдствіе эндотермической реакціи съ раскаленнымъ углемъ [2])

$$H_2O + C = CO + 2H;$$

съ другой стороны, повышаетъ содержаніе водорода въ газѣ. Оба же эти обстоятельства, — низкая температура и большое количество водорода,—способствуютъ образованію амміака, или, по крайней мѣрѣ, задерживаютъ его разложеніе.

Количество пара, которое можетъ быть примѣшано къ дутью, ограничено только тѣмъ соображеніемъ, что оно не должно остановить горѣніе угля, понизивъ температуру ниже его точки вос-

---

[1]) См. §§ 327—330, въ особенности рис. 118.

[2]) § 330.

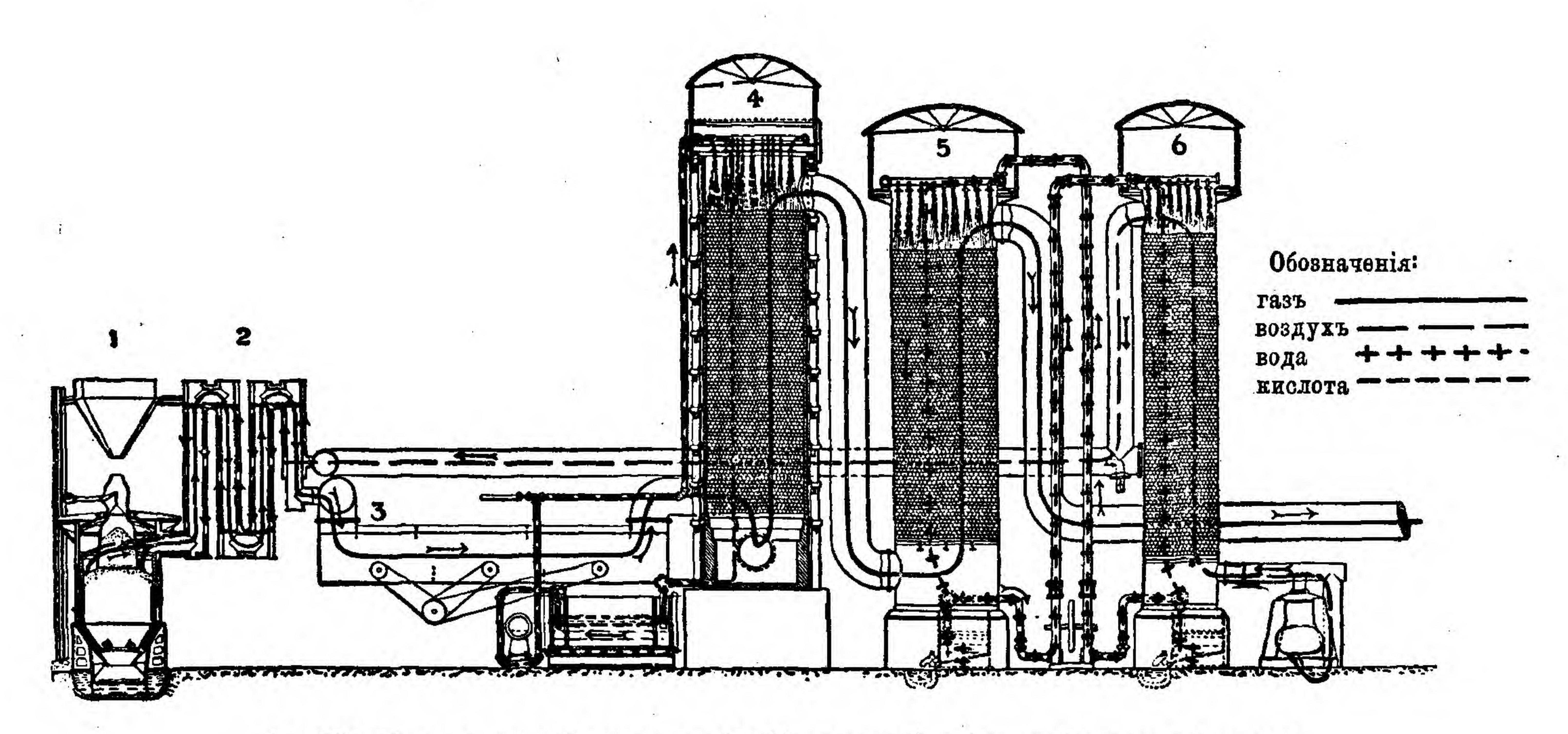


Рис. 122. Чертежъ газовой установки Mond'a, съ поглощеніемъ побочныхъ продуктовъ.

1—газовый генераторъ; 2—рекуператоръ; 3—механическая промывка газа; 4—башня, гдѣ происходитъ поглощеніе аммiака слабой сѣрной кислотой, съ образованіемъ $(NH_4)_2SO_4$; 5—башня, гдѣ происходитъ дальнѣйшая промывка и охлажденіе газа. Промывная вода идетъ въ башню 6 и служитъ для подогрѣванія воздуха; 6—башня, гдѣ происходитъ нагрѣваніе воздуха горячей водой изъ башни 5.

пламененія. Отсюда слѣдуетъ, что если мы станемъ подогрѣвать смѣсь пара и воздуха, то тѣмъ самымъ мы повысимъ температуру зоны горѣнія *B*, рис. 123, а это и дастъ намъ возможность соотвѣтственно увеличить пропорцію пара. Чтобы увидѣть, какъ производится смѣшеніе воздуха и пара и какъ подогрѣваютъ эту смѣсь, прослѣдимъ сперва путь воздуха справа налѣво на рис. 122. Способъ же улавливанія амміака изъ газа мы затѣмъ уяснимъ себѣ, прослѣдивъ путь газа изъ генератора съ лѣвой стороны до поступленія его въ металлургическую печь справа.

Воздухъ, вдуваемый у дна башни 6, насыщается паромъ и подогрѣвается, подымаясь черезъ нее и приходя на своемъ пути въ соприкосновеніе съ потокомъ горячей воды. Вода же эта передъ тѣмъ нагрѣвается, протекая черезъ башню 5 и встрѣчаясь въ ней съ подымающимся токомъ горячаго газа. Подогрѣтый такимъ путемъ воздухъ и находящійся въ смѣси съ нимъ паръ подвергаются дальнѣйшему нагрѣванію, проходя черезъ кольцеобразное пространство между внѣшними и внутренними концентричными трубами рекуператора 2, въ то время какъ по внутреннимъ трубамъ его проходитъ горячій газъ прямо изъ верхней части генератора. Наконецъ, температуру паровъ воды и воздуха повышаютъ еще болѣе, пропуская ихъ черезъ кольцеобразное пространство между желѣзной внѣшней стѣнкой, *E*, рис. 123, и внутренней цилиндрической изъ огнеупорнаго кирпича стѣнкой *D* самого генератора, въ который они затѣмъ поступаютъ въ *B*.

Вернемся теперь къ газу. Прежде всего обратимъ вниманіе на центральный цилиндръ *A*, рис. 123, который, вмѣстѣ съ кольцеобразнымъ внѣшнимъ пространствомъ, составляетъ главную отличительную черту этого генератора. Уголь при загрузкѣ попадаетъ въ этотъ цилиндръ и начинаетъ постепенно выдѣлять летучія вещества при сравнительно очень низкой температурѣ. Низкая температура въ цилиндрѣ обусловливается тѣмъ, что онъ расположенъ далеко отъ области горѣнія и защищенъ отъ тока горячаго газа, поднимающагося изъ этой области, а также, тѣмъ что верхняя часть генератора охлаждается паромъ и воздухомъ, циркулирующими въ кольцеобразномъ пространствѣ между *D* и *E*.

Выдѣляющійся изъ угля газъ въ смѣси съ окисью углерода и водородомъ, поднимающимися изъ области горѣнія, поступаетъ,

изъ верхней части генератора черезъ рекуператоръ 2 въ промывательный аппаратъ 3; здѣсь отлагаются сажа и смола, а амміакъ переходитъ въ NH_4OH и смѣшивается съ большимъ количествомъ водяного пара. Отсюда газъ поступаетъ въ башню 4, гдѣ онъ встрѣчается съ токомъ слабой сѣрной кислоты, и гдѣ амміакъ переходитъ въ сѣрнокислый аммоній,

$$2NH_4OH + H_2SO_4 =$$
$$= (NH_4)_2SO_4 + 2H_2O.$$

Вслѣдъ за этимъ газъ поступаетъ въ башню 5, гдѣ онъ отдаетъ остатокъ своего тепла, а также смолы, уже упомянутому выше потоку воды.

Нагрѣтая такимъ образомъ вода, по удаленіи изъ нея смолы, поступаетъ въ башню 6, гдѣ и отдаетъ вступающему воздуху только что полученное въ башнѣ 5 отъ генераторнаго газа тепло. Непрерывно циркулируя, вода отнимаетъ тепло отъ газа въ башнѣ 5 и отдаетъ его воздуху въ башнѣ 6.

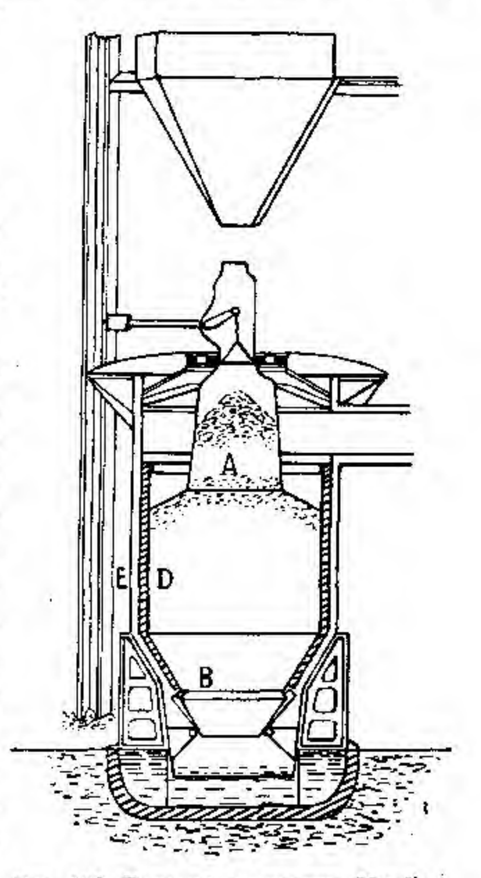


Рис. 123. Газовый генераторъ Mond'а.

Растворъ сѣрнокислаго аммонія изъ башни 4 вновь черезъ нее пропускается, и это продолжается до тѣхъ поръ, пока концентрація сѣрнокислаго аммонія въ немъ не достигнетъ приблизительно 36%. Тогда растворъ выпариваютъ и выдѣляютъ изъ него сѣрнокислый аммоній кристаллизаціей.

Сѣрнокислый аммоній, составляетъ очень цѣнный побочный продуктъ, такъ какъ спросъ на него для земледѣльческихъ цѣлей практически неограниченъ. Но противъ полученія его такимъ простымъ и дѣйствительнымъ путемъ говоритъ, во-первыхъ, большая стоимость установки аппаратовъ, во-вторыхъ, насколько

можно судить по опубликованнымъ анализамъ, дурное качество генераторнаго газа.

343) Доменный процессъ съ сухимъ дутьемъ, по системѣ Gayley [1]). — Для конденсаціи влаги, содержащейся въ дутьѣ, примѣняемомъ при доменномъ процессѣ, James Gayley пропускаетъ его вокругъ большого змѣевика изъ желѣзныхъ трубъ, по которому циркулируетъ охладительная смѣсь, а затѣмъ нагрѣваетъ его обычнымъ образомъ, продувая черезъ нагрѣвательныя печи. Для удаленія льда, образовывающагося на внѣшней поверхности трубъ, черезъ часть ихъ время отъ времени пропускается горячій растворъ соли. Ледъ стаиваетъ, и образующуюся воду удаляютъ. Благодаря такой простой сушкѣ дутья, экономія топлива достигаетъ 19%—величины, на первый взглядъ, совершенно непропорціональной тому уменьшенію затраты тепла, которое вызывается отсутствіемъ влаги. Кромѣ того, доменная печь при сухомъ дутьѣ работаетъ гораздо равномѣрнѣе. Сухое дутье понижаетъ температуру колошниковыхъ газовъ и увеличиваетъ процентное содержаніе въ нихъ углекислаго газа, а это все признаки гораздо болѣе полной утилизаціи топлива.

Давно уже было извѣстно, что влага, содержащаяся въ дутьѣ и берущая начало изъ атмосферы, очень замѣтнымъ образомъ понижаетъ температуру въ нижней части доменной печи, вслѣдствіе того, что разложеніе паровъ воды представляетъ собою хорошо намъ знакомую эндотермическую реакцію

[31] . . . . $H_2O + C = CO + 2H.$

Въ нижней же части печи какъ разъ и нужна самая высокая температура для плавленія желѣза и шлака, для удаленія сѣры и для возстановленія кремнія.

Кромѣ того, уже давно было извѣстно, что доменная печь требуетъ больше топлива въ теплую и, особенно, сырую погоду, чѣмъ въ холодную и сухую, гораздо больше лѣтомъ, чѣмъ зимой. Извѣстно было и то, что перемѣна погоды отъ холодной и сухой къ теплой и влажной вызываетъ быстрое пониженіе температуры горна, если этому не противодѣйствовать повыше-

---

[1]) «Journ. Iron and Steel Inst.» 1904, II, стр. 274—300; 1905, I, стр. 256; «Trans. Am. Inst. Mining Engineers», XXXV, 1905, стр. 746.

ніемъ въ немъ жара, и увеличиваетъ въ чугунѣ содержаніе сѣры, уменьшая въ то же время содержаніе въ немъ кремнія. Объясняется это тѣмъ, что какъ для удаленія сѣры, такъ и для возстановленія кремнія нужна высокая температура. Однако, совершенно нельзя было предвидѣть, что сушка дутья дастъ такую большую экономію топлива, какъ показалъ Gayley. Болѣе того, когда онъ опубликовалъ свои наблюденія самымъ подробнымъ образомъ и обставивъ ихъ всѣми гарантіями достовѣрности, многіе ученые металлурги, не задумываясь, отвергали ихъ и считали абсурдомъ.

344) Причины, обусловливающія экономію въ топливѣ.— Не требуется особыхъ поясненій, почему удаленіе влаги изъ дутья должно вести къ болѣе равномѣрной работѣ доменной печи. По тщательномъ же изученіи вопроса, довольно ясно становится и то, почему удаленіе влаги изъ дутья влечетъ за собою гораздо большую экомомію въ топливѣ, чѣмъ та, которая вызывается сохраненіемъ тепла, потребнаго на разложеніе паровъ воды и ихъ нагрѣваніе. Совокупность тѣхъ причинъ, которыми вызывается это, на первый взглядъ, удивительное явленіе, намъ станетъ гораздо понятнѣе, если мы подойдемъ къ вопросу съ другой стороны, а именно, если сперва вообразимъ себѣ ходъ доменнаго процесса при сухомъ дутьѣ, а затѣмъ посмотримъ, какъ на него должно вліять присутствіе въ дутьѣ влаги. Стоя на такой точкѣ зрѣнія, мнѣ кажется, что присутствіе влаги въ дутьѣ такъ сильно увеличиваетъ расходъ топлива въ силу слѣдующихъ причинъ.

Во-первыхъ, влага понижаетъ температуру, развивающуюся въ горнѣ вслѣдствіе горѣнія угля, и тѣмъ самымъ сильно съуживаетъ и безъ того относительно неширокій интервалъ между температурой горѣнія и «критической» температурой, при которой и выше которой совершается большая часть «критической» работы печи (терминъ этотъ будетъ ниже поясненъ). Благодаря этому, пропорціонально уменьшается количество тепла, которое можетъ идти на эту критическую работу.

Во-вторыхъ, подъ вліяніемъ влаги происходитъ пониженіе температуры дутья, которое ведетъ къ дальнѣйшему пониженію температуры горѣнія, къ съуженію интервала между нею и критическою температурою и къ уменьшенію количества тепла, которое можетъ идти на критическую работу. Въ случаѣ Gayley, пони-

женіе температуры вызывается тѣмъ, что въ нагрѣвательныхъ печахъ даннаго размѣра приходится нагрѣвать большее количество дутья, а не увеличеніемъ отношенія между вѣсомъ нагрѣваемаго дутья и вѣсомъ газа, служащаго для его нагрѣванія. Доказательствомъ послѣдняго сужитъ то, что, повидимому, не наблюдается сколько нибудь замѣтнаго увеличенія процентнаго содержанія азота въ колошниковыхъ газахъ.

Въ то же время имѣются указанія на то, что при пропусканіи влажнаго дутья печи Gayley оказываются перегруженными; это видно изъ того, что влажное дутье нагрѣвается въ нихъ до менѣе высокой температуры, чѣмъ сухое, несмотря на то, что какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ количественное отношеніе между газомъ, служащимъ для нагрѣванія, и дутьемъ, повидимому, остается постояннымъ, а также на то, что при влажномъ дутьѣ газъ, служащій для нагрѣванія, богаче окисью углерода, чѣмъ при сухомъ [1]).

Изъ вышесказаннаго слѣдуетъ, что значительной части экономіи въ топливѣ, вызываемой примѣненіемъ сухого дутья, повидимому, можно было бы достигнуть и при влажномъ дутьѣ путемъ увеличенія размѣра нагрѣвательныхъ печей.

Въ-третьихъ, возмѣщеніе только что указанной потери тепла, потребнаго для критической работы печи, и возмѣщеніе тепла, расходующагося на диссоціацію паровъ воды, требуетъ совершенно несоразмѣрнаго увеличенія затраты топлива. Это объ-

[1]) Это легко показать. Составъ колошниковыхъ газовъ былъ слѣдующій:

	Съ сухимъ дутьемъ.	Съ влажнымъ дутьемъ.
Окись углерода	19,9%	22,4%
Углекислота.	16,0 »	13,0 »
Азотъ и водородъ, по разности . .	64,1 »	64,7 »
Сумма.	100,0%	100,0%
Температура газа. . .	191° Ц.	281° Ц.

Такимъ образомъ, процентное содержаніе азота одинаково какъ при сухомъ, такъ и при влажномъ дутьѣ, или, иначе говоря, количество азота на единицу газа какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ остается одинаковымъ. А такъ какъ источникомъ азота является исключительно дутье и количество его на единицу дутья постоянно, то это все равно, что сказать, что какъ при сухомъ, такъ и при влажномъ дутьѣ на единицу дутья количество газа, служащаго для его нагрѣванія, одинаково.

ясняется тѣмъ, что только незначительная часть тепла, развиваемая этимъ избыточнымъ топливомъ, можетъ быть утилизированая. Та же часть тепла, которая не утилизируется, очевидно, должна находиться въ колошниковыхъ газахъ и такимъ образомъ теряться. Отсюда вполнѣ ясно, почему сушка дутья вызываетъ пониженіе температуры колошниковыхъ газовъ.

Въ-четвертыхъ, колошниковые газы, обладая болѣе высокой температурой, при влажномъ дутьѣ легче вступаютъ во взаимодѣйствіе съ засыпаемымъ коксомъ, согласно реакціи

[27] . . . . $CO_2 + C = 2\,CO$,

а это опять-таки повышаетъ расходъ топлива.

345) Значеніе первоначальной температуры газа въ процессахъ нагрѣванія съ критической температурой.—Прежде всего поясним на примѣрѣ кипяченія воды, въ какомъ смыслѣ здѣсь примѣняется выраженіе «критическая» температура.

При кипяченіи воды нагрѣваніе можно подраздѣлить на два періода. Первый, когда вода нагрѣвается отъ первоначальной ея температуры, положимъ, 0°Ц., до точки кипѣнія; это требуетъ сравнительно небольшой затраты тепла. Второй, кипѣніе воды при атмосферномъ давленіи, на что требуется въ 5,36 раза больше тепла. Точку кипѣнія можно назвать здѣсь критической точкой, работу же, которая тратится на поддерживаніе кипѣнія—критической работой. Критическая работа совершается подъ вліяніемъ тепла, которое тратится выше критической точки.

Для лучшаго уясненія, сравнимъ процессъ кипяченія воды съ процессомъ, не обладающимъ критической температурой, напримѣръ съ нагрѣваніемъ до 1000° столба изъ мѣдныхъ шаровъ, заключенныхъ въ вертикальномъ колодцѣ съ адіабатическими стѣнками (т. е. абсолютно не пропускающими тепла), при помощи горячаго газа, поднимающагося черезъ этотъ столбъ. Предположимъ, что мы будемъ удалять каждый шаръ по достиженіи имъ 1000°, но не раньше.

Какъ здѣсь, такъ и въ дальнѣйшемъ изложеніи мы не будемъ принимать въ расчетъ измѣненія теплоемкости въ зависимости отъ температуры и будемъ считать, что для нагрѣванія одного грамма мѣди на одинъ градусъ требуется одинаковое количество тепла какъ при низкой, такъ и при высокой температурѣ. Здѣсь необходимо ясно себѣ представлять, что подъ полной

утилизаціей тепла, содержащагося въ газахъ, подразумѣвается, что тепло это почти нацѣло передается мѣднымъ шарамъ, и что прежде, чѣмъ оставить шары, газы вполнѣ охлаждаются.

Для того, чтобы при этихъ условіяхъ тепло газа передавалось шарамъ почти нацѣло, необходимо, чтобы первоначальная температура газа была выше 1000°. Если температура только немного выше 1000°, количество газа должно быть велико и онъ долженъ находиться продолжительное время въ соприкосновеніи съ шарами. Если же температура гораздо выше 1000°, то какъ количество газа, такъ и продолжительность соприкосновенія его съ шарами могутъ быть соотвѣтственно меньше. Здѣсь недостаточно высокая температура можетъ быть возмѣщена количествомъ тепла, однако, въ томъ только случаѣ, если существуетъ извѣстная разность между первоначальной температурой газа и конечной температурой, которой должны достигнуть шары.

Конечно, лучше, чтобы эта разность была велика, но и незначительной разности довольно. Въ 50 граммахъ газа при 1100° содержится столько же тепла, сколько въ 25 граммахъ при 2200°, и теоретически, въ общемъ, тепло, содержащееся въ 50 граммахъ, должно утилизироваться почти настолько же при прохожденіи черезъ столбъ мѣдныхъ шаровъ, какъ и тепло, содержащееся въ 25 граммахъ. Иными словами, какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ одинаковая часть всего тепла должна сообщиться шарамъ при прохожденіи газа между ними. Главную роль играютъ здѣсь количества тепла, а не первоначальная температура газа, при томъ, однако, условіи, если она выше той температуры, до которой должны быть нагрѣты мѣдные шары.

Само собой разумѣется, что для того, чтобы использовать тепло газа, имѣющаго температуру 1100°, одинаково полно, какъ тепло газа, имѣющаго температуру 2200°, столбъ мѣдныхъ шаровъ долженъ быть длиннѣе; ибо для того, чтобы нагрѣть одинаковое число шаровъ въ часъ, надо пропустить вдвое большее количество газа, имѣющаго температуру 1100°, а слѣдовательно и съ вдвое большей скоростью, чѣмъ газа, имѣющаго температуру 2200°. Далѣе, при охлажденіи до одинаковой температуры, положимъ до 110°, процентъ использованнаго тепла по отношенію къ первоначальному теплу въ случаѣ газа съ пер-

воначальной температурой 1100° былъ бы вдвое меньше, чѣмъ въ случаѣ газа съ первоначальной температурой 2200°. Короче говоря, трудно использовать тепло газа, обладающаго низкой начальной температурой, такъ же полно, какъ газа, обладающаго высокой начальной температурой. Для того чтобы утилизація была приблизительно одинакова какъ въ томъ, такъ и въ другомъ случаѣ, необходимы гораздо лучшія условія передачи тепла въ случаѣ газа съ болѣе низкой температурой.

Вліяніе первоначальной температуры газа въ процессахъ съ критической температурой представляетъ собою величину совершенно иного порядка. При этихъ процессахъ первоначальная температура играетъ такую же роль, какъ и количество тепла.

Такъ, даже безконечно большое количество газа, имѣющаго температуру 99°, не въ состояніи нагрѣть до кипѣнія хотя бы одного грамма воды при атмосферномъ давленіи. Положимъ, что для нагрѣванія и поддержанія кипѣнія воды мы желаемъ воспользоваться тепломъ, содержащимся въ струѣ газа, напримѣръ, въ газообразныхъ продуктахъ горѣнія изъ топки. Такой газъ можетъ поддерживать кипѣніе только постолько, посколько его температура выше 100°.

Газъ, съ первоначальной температурой 101°, въ состояніи отдать на поддержаніе кипѣнія только около 1% своего тепла, въ отличіе отъ того, что онъ можетъ отдать на нагрѣваніе воды до точки кипѣнія. Дѣло въ томъ, что, отдавъ 1% тепла и охладившись вслѣдствіе этого до 100°, газъ теряетъ способность отдавать тепло водѣ, имѣющей уже температуру 100°.

Если первоначальная температура газа 105°, теоретически приблизительно 5% тепла могутъ быть использованы на поддержаніе кипѣнія воды. При 1000° теоретически могутъ быть использованы 90%. Такимъ образомъ повышеніе первоначальной температуры газа съ 101° до 105°, или только на 4%, повышаетъ на 400% пропорцію тепла, которая можетъ быть использована на поддержаніе кипѣнія воды.

Сдѣлаемъ еще шагъ дальше и посмотримъ, какова должна быть первоначальная температура газа для полной утилизаціи его тепла, т. е. для того, чтобы оно улавливалось нацѣло водою, во-первыхъ, въ то время, какъ она нагрѣвается до точки кипѣнія, а во-вторыхъ, при кипѣніи ея. Для этого первоначальная температура газа должна быть такова, чтобы количество

тепла, отдаваемаго газомъ при охлажденіи до 100°, относилось къ количеству тепла, отдаваемаго имъ при охлажденіи, начиная съ 100°, по меньшей мѣрѣ, какъ количество работы, затрачиваемой на поддержаніе кипѣнія, относится къ количеству работы, затраченной на нагрѣваніе воды до точки кипѣнія, т. е. по крайней мѣрѣ, какъ 5,36 : 1. А такъ какъ (попрежнему пренебрегая измѣненіями теплоемкости) тепло, отдаваемое при охлажденіи, пропорціонально температурному интервалу, захватываемому охлажденіемъ, то отсюда слѣдуетъ, что разность между первоначальной температурой газа и 100° должна относиться къ 100°, по крайней мѣрѣ, какъ 5,36 : 1. Короче говоря, начальная температура газа должна быть 100° + 536° = 636°.

Если она ниже, то количество газа должно быть очень велико для того, чтобы доставить требуемое для поддержанія кипѣнія тепло. При этомъ большое количество тепла должно оставаться неиспользованнымъ и теряться, такъ какъ по охлажденіи газа до 100° вода, нагрѣтая до 100°, не въ состояніи больше отнять отъ него тепла.

Выразимъ это въ болѣе общемъ видѣ. Положимъ, что

t_k = критической температурѣ;

t_n = начальной температурѣ газа, обыкновенно температурѣ горѣнія;

h_k = теплу, которое должно быть доставлено при критической температурѣ и выше ея;

h_b = теплу, которое необходимо для того, чтобы нагрѣть тѣло до критической температуры.

Для наиболѣе выгоднаго использованія тепла начальная температура газа или температура горѣнія должна быть равна или выше температуры, слѣдующей изъ формулы

$$(t_n - t_k) : t_k = h_k : h_b;$$

[35] . . . . $$t_n = t_k\left(1 + \frac{h_k}{h_b}\right).$$

Итакъ, процессы, требующіе непрерывнаго нагрѣванія, при которыхъ источникомъ тепла служатъ газообразные продукты горѣнія или другіе горячіе газы, могутъ быть подраздѣлены на процессы, обладающіе критической температурой, и на процессы, у которыхъ критическая температура отсутствуетъ.

При критической же температурѣ и выше критической, какъ мы уже знаемъ, требуется больше тепла, чѣмъ ниже ея, вслѣдствіе того, что происходитъ какая либо реакція, поглощающая тепло, переходъ изъ одного состоянія въ другое или нѣчто подобное.

Эти два рода процессовъ сильно отличаются въ отношеніи начальной температуры, которой должны обладать газы, чтобы происходила хорошая утилизація ихъ тепла.

Если процессъ не обладаетъ критической температурой, тогда достаточно, чтобы была нѣкоторая разница между начальной температурой газа и температурой, до которой требуется нагрѣть данные предметы; величина этой разницы играетъ второстепенную роль. Если же процесъ обладаетъ критической температурой, тогда эта разница должна по крайней мѣрѣ удовлетворять уравненію [35].

Большинство металлургическихъ процессовъ имѣетъ критическую температуру, или даже нѣсколько критическихъ температуръ. При процессахъ плавленія критической температурой является точка плавленія обрабатываемаго металла. При отливкѣ чугуна, точка плавленія чугуна является критической температурой, а критическая работа состоитъ въ доставленіи скрытаго тепла плавленія. При обжиганіи известняка критической температурой является точка диссоціаціи углекислаго кальція; критическая работа состоитъ въ доставленіи тéпла, поглощаемаго при диссоціаціи.

Простые процессы нагрѣванія, съ другой стороны, не обладаютъ, вообще говоря, критической температурой. При нагрѣваніи мѣдныхъ брусковъ въ непрерывно работающей печи, на подобіе печи Morgan'а, рис. 113, критическая температура отсутствуетъ, точно такъ же, какъ и при нагрѣваніи стальныхъ заготовокъ въ такой печи, или стальныхъ болванокъ въ регенеративной печи, конечно, если не принимать въ расчетъ незначительнаго избытка тепла, котораго требуетъ нагрѣваніе стали въ критическомъ интервалѣ отъ A_{c_1} до A_{c_3}.

346) Провѣрка уравненія 35.—Провѣримъ вышеуказанный законъ на трехъ случаяхъ: во-первыхъ, когда начальная температура газа равна требуемой закономъ, во-вторыхъ, когда она ниже, и въ-третьихъ, когда она выше.

Случай 1. Распредѣленіе тепла, доставляемаго газомъ съ начальной температурой 636° при нагрѣваніи и кипѣніи воды. Для того чтобы нагрѣть 1 граммъ воды отъ 0° до точки кипѣнія 100°, нужно $1 \times 1 \times 100 =$ . . . . 100 калорій.

Скрытая теплота испаренія 1 грамма воды, находящейся при точки кипѣнія, составляетъ. . . 536 калорій

Въ общемъ теплота испаренія составляетъ. 636 калорій.

Если приложить эти числа къ уравненію [35], то окажется, что температура продуктовъ горѣнія t_n должна по крайней мѣрѣ составлять

$$t_n = 100\left(1 + \frac{536}{100}\right) = 636°.$$

Разсмотримъ теперь, какъ можно использовать это тепло при нагрѣваніи и кипяченіи воды.

При охлажденіи съ 636° до 100°, 50 граммовъ газа, теплоемкость котораго, допустимъ, составляетъ 0,25, выдѣлятъ

$$(636 - 100) \times 50 \times 0{,}25 = 6700 \text{ калорій.}$$

Это количество тепла можетъ превратить въ паръ, если оно нацѣло уйдетъ на кипѣніе воды, находящейся уже при 100°,

$$\frac{6700}{536} = 12{,}5 \text{ граммовъ воды.}$$

При этомъ газъ охладится до 100° и будетъ содержать

$$100 \times 50 \times 0{,}25 = 1250 \text{ калорій.}$$

Если на пути отъ котла къ дымовой трубѣ газъ пройдетъ черезъ рядъ приспособленій для подогрѣванія воды, поступающей въ котелъ, и если эти приспособленія не представляютъ никакого препятствія для передачи тепла отъ газа къ водѣ, то теоретически всѣ 1,250 калорій нацѣло могутъ быть поглощены и использованы для нагрѣванія воды до 100°. Сколько при этомъ граммовъ воды можетъ нагрѣть газъ? Очевидно, 1.250 надо раздѣлить на количество тепла, которое требуется для того, чтобы нагрѣть 1 граммъ воды съ 0° до 100°, или

$$\frac{1{,}250}{1 \times 100} = 12{,}5 \text{ граммовъ.}$$

Иначе говоря, на 1 граммъ воды приходится 4 грамма газа.

Короче говоря, тепло, которымъ обладаетъ газъ, по совершеніи критической работы, состоящей въ превращеніи 12,5 граммовъ воды въ паръ, теоретически можетъ быть нацѣло использовано для подогрѣванія соотвѣтствующихъ 12,5 граммовъ воды до критической температуры. Такимъ образомъ, процессъ можетъ идти непрерывно съ полной утилизаціей тепла, при чемъ газы, отдавъ свое тепло, охлаждаются до 0°.

Случай 2. Распредѣленіе тепла при нагрѣваніи и кипѣніи воды, когда газы обладаютъ начальной температурой 318°. Общее количество тепла, заключающагося въ 50 граммахъ, составляетъ:

$$50 \times 318 \times 0,25 = 3975 \text{ калорій.}$$

При охлажденіи съ 318° до 100°, 50 граммъ газа выдѣляютъ

$$(318 - 100) \times 50 \times 0,25 = 2725 \text{ калорій.}$$

2725 калорій могутъ превратить въ паръ

$$\frac{2725}{536} = 5,1 \text{ граммовъ воды,}$$

или на 1 граммъ воды приходится 9,8 граммовъ газа.

Послѣ этого въ газѣ останется еще

$$100 \times 50 \times 25 = 1250 \text{ калорій.}$$

Но это тепло не можетъ служить для поддержанія кипѣнія, такъ какъ вода нагрѣтая до 100°, не въ состояніи отнять тепла отъ газа, температура котораго 100°. Поэтому, это тепло единственно можетъ послужить для подогрѣванія до точки кипѣнія новыхъ 5,1 грамма воды, которые должны замѣнить собою только что превращенные въ паръ 5,1 грамма воды. Но 5,1 грамма воды при этомъ могутъ отнять отъ газа только

$$100 \times 5,1 = 510 \text{ калорій,}$$

или около 41% всего остающагося въ нихъ тепла. Остающіяся 1250 — 510 = 740 калорій не улавливаются при подогрѣваніи воды и теряются, если только онѣ не утилизируются для другихъ какихъ либо цѣлей.

Сравнивая съ случаемъ 1-мъ, мы видимъ, что пониженіе начальной температуры газа на 50%, съ 638° до 318°, влечетъ за собою потерю $\frac{740 \times 100}{3975} = 19\%$ тепла заключающагося въ газѣ; въ случаѣ же 1-мъ тепло утилизировалось нацѣло.

Изъ выраженія

$$[36] \ldots\ldots\ldots\ldots\ t = \frac{H}{W \times S \cdot H}.$$

гдѣ H число калорій, заключающееся въ газахъ, W вѣсъ газовъ въ граммахъ, $S \cdot H$ ихъ удѣльная теплоемкость, мы находимъ, что конечная температура газовъ, по выходѣ ихъ изъ аппаратовъ для подогрѣванія воды, теоретически должна быть

$$t = \frac{740}{50 \times 0{,}25} = 59^\circ.$$

Случай 3. Распредѣленіе тепла при нагрѣваніи и кипѣніи воды, когда газъ обладаетъ начальной температурой 1272°. Въ данномъ случаѣ полная утилизація тепла еще легче осуществима, чѣмъ въ случаѣ 1-мъ, по той простой причинѣ, что здѣсь пропорція тепла, которое можетъ идти на поддержаніе кипѣнія, гораздо больше, чѣмъ въ случаѣ 1-мъ. Притомъ, избытокъ этотъ можетъ служить или для поддержанія кипѣнія, или для подогрѣванія до 100°.

При охлажденіи съ 1272° до 0°, 50 граммъ газа выдѣляютъ

$$1272 \times 50 \times 0{,}25 = 15900 \text{ калорій.}$$

15900 калорій способны нагрѣть и превратить въ паръ

$$\frac{15900}{636} = 25 \text{ граммовъ воды.}$$

Тепло, потребное на превращеніе въ паръ 25 граммовъ воды, въ отличіе отъ тепла, потребнаго для того чтобы нагрѣть ихъ до 100°, составляетъ

$$25 \times 536 = 13400 \text{ калорій.}$$

50 граммовъ газа, отдавъ 13400 калорій, охладятся на

$$\frac{13400}{50 \times 0,25} = 1072^\circ,$$

иначе говоря, температура ихъ понизится съ 1272° до 200°.

Теперь надо уловить остающееся въ газахъ тепло. Для этого 25 граммовъ воды, которые должны замѣнить собою 25 граммовъ воды, превратившейся въ паръ, должны при нагрѣваніи до точки кипѣнія поглотить все заключающееся въ газахъ тепло или

$$200 \times 50 \times 0,25 = 2500 \text{ калорій.}$$

Для того же, что бы нагрѣть 25 граммовъ воды отъ 0° до 100° какъ разъ и требуется

$$25 \times 100 \times 1 = 2500 \text{ калорій,}$$

или на одинъ граммъ воды приходится 2 грамма газа.

Слѣдовательно, если устроить такъ, чтобы газы тотчасъ по охлажденіи до 200° оставляли котелъ и поступали въ аппараты для подогрѣванія питающей его воды, и если стѣнки этихъ аппаратовъ будутъ сдѣланы изъ матеріала идеально хорошо проводящаго тепло, то все тепло, остающееся въ газахъ по свершеніи ими работы свыше критической температуры или температуры кипѣнія, можетъ быть утилизировано для нагрѣванія до критической температуры той воды, которая должна замѣнить собою воду, только что передъ тѣмъ перешедшую въ паръ. При такомъ устройствѣ утилизація тепла должна идти напѣло.

Едва ли нужно говорить о томъ, что такое устройство невозможно на практикѣ, и что идеальные проводники тепла, какъ и идеальные адіабатическіе матеріалы, существуютъ только въ воображеніи, подобно философскому камню. Значеніе этихъ разсужденій, однако, заключается въ томъ, что они помогаютъ уяснить тѣ предѣлы, къ которымъ мы стремимся, но которыхъ никогда нельзя будетъ достигнуть.

Подведемъ теперь итогъ всему вышеизложенному.

Если температура горѣнія	Процентъ использованнаго тепла	Конечная температура газовъ	На каждый граммъ воды требуется	
636°	100	0°	4	грамма газа.
318°	81	59°	9,8	грамма газа.
1272°	100	0°	2	грамма газа.

Итакъ, приведенный выше законъ находитъ себѣ при повѣркѣ полное подтвержденіе. Ибо, когда (случай 1) начальная температура такова, какъ этого требуетъ законъ, или выше (случай 3), утилизація тепла газовъ, служащихъ для нагрѣванія, совершается нацѣло; когда же (случай 2) начальная температура наполовину ниже, требуемой закономъ, то даже теоретически можетъ быть использованъ только 81% этого тепла.

347) Значеніе критической температуры въ доменномъ процессѣ. — Въ доменномъ процессѣ важныхъ критическихъ температуръ двѣ, а по всей вѣроятности даже больше. Количество критическаго тепла, т. е. тепла, которое должно быть доставлено выше этихъ температуръ, вѣроятно, очень велико. Точки плавленія желѣза и шлака представляютъ собою двѣ критическія температуры, относительно существованія которыхъ не можетъ быть никакого вопроса. Количество скрытаго тепла плавленія желѣза и шлака, вѣроятно, очень велико. Далѣе, возстановленіе кремнія, согласно реакціи

$$[15] \ldots\ldots\ldots\ldots SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

и удаленіе сѣры, согласно ли реакціи

$$[30] \ldots\ldots\ldots FeS + CaO + C = CaS + CO + Fe$$

или другимъ путемъ, вѣроятно, требуетъ еще болѣе высокой температуры и большаго количества тепла.

Разсмотримъ теперь первую изъ указанныхъ въ § 344 причинъ экономіи топлива при процессѣ Gayley, а именно, что удаленіе влаги изъ дутья сильно увеличиваетъ интервалъ между температурой горѣнія и критической температурой и тѣмъ самымъ соотвѣтственно увеличиваетъ пропорцію тепла, которая можетъ быть утилизирована для критической работы. Совершенно подобнымъ же образомъ повышеніе начальной температуры газовъ, служащихъ для поддержанія кипѣнія воды, съ 101° до 105° увеличиваетъ количество тепла, которое можетъ расходоваться на критическую работу—превращеніе воды въ паръ—приблизительно на 400%.

Подробное изслѣдованіе этихъ критическихъ температуръ, а также количествъ тепла, потребныхъ для критической работы въ каждомъ случаѣ, завело бы насъ за предѣлы настоящаго труда.

Для иллюстраціи примемъ, однако, за критическую температуру 1300°[1]), между точкой плавленія желѣза и точкой плавленія шлака.

Далѣе, согласно вычисленіямъ профессора J. W. Richards'a [2]), примемъ, что температура горѣнія (т. е. начальная температура газовъ по сгораніи ихъ въ горнѣ, прежде чѣмъ они отдадутъ сколько нибудь тепла окружающимъ твердымъ или расплавленнымъ матеріаламъ) при сухомъ дутьѣ составляетъ 1965°, при влажномъ 1861°, и посмотримъ, какое дѣйствіе долженъ оказать переходъ отъ сухого къ влажному дутью.

При температурѣ горѣнія 1965° интервалъ между нею и критической температурой равенъ 665°; при температурѣ же горѣнія 1861° этотъ интервалъ равенъ 561°, т. е. онъ составляетъ только 84% предыдущаго. Но при болѣе низкой температурѣ горѣнія и при болѣе узкомъ интервалѣ затрата тепла на критическую работу при температурѣ выше критической должна быть равна затратѣ тепла при болѣе высокой температурѣ горѣнія. Какимъ образомъ этого можно достигнуть? Одно изъ двухъ, или поднявъ температуру горѣнія до прежняго уровня и тѣмъ самымъ возстановивъ прежній интервалъ между температурой

---

[1]) Разумѣется, что критическая работа, которая затрачивается на плавленіе шлака, должна быть произведена при точкѣ плавленія шлака, лежащей гораздо выше 1300°. Было бы однако неправильно, если бы мы сосредоточили все свое вниманіе на этой высшей температурѣ, потому что при этомъ мы не приняли бы въ расчетъ того факта, что значительная часть тепла, остающагося въ газахъ послѣ плавленія шлака, можетъ служить не только для нагрѣванія твердыхъ матеріаловъ до критической температуры, но и для того, чтобы производить критическую работу плавленія желѣза при его точкѣ плавленія, скажемъ, при 1200°. Съ другой стороны, сосредоточивъ свое вниманіе исключительно на нижней критической точкѣ, на точкѣ плавленія желѣза, мы также поступили бы неправильно, такъ какъ мы упустили бы изъ виду критическую работу плавленія шлака. Такимъ образомъ мы до извѣстной степени условно будемъ принимать за критическую температуру 1300°.

Моя цѣль состоитъ не въ томъ, чтобы точно вычислить, какъ велика должна быть экономія топлива при удаленіи паровъ воды изъ дутья, а скорѣе въ томъ, чтобы показать, что эта экономія очень велика и совсѣмъ не пропорціональна количеству тепла, которое непосредственно требуется для нагрѣванія и диссоціаціи паровъ воды.

[2]) «The Application of Dry-Air Blast to the Manufacture of Iron» появится, вѣроятно, въ томѣ XXXVI «Trans. American Inst. of Mining Engineers».

горѣнія и критической температурой, или сжигая большее количество топлива.

Повысить температуру горѣнія до прежняго уровня можно различными способами. Напримѣръ, повысивъ температуру дутья, и такимъ образомъ повысивъ непосредственно температуру, съ которой начинается горѣніе; или уменьшивъ количество азота въ дутьѣ и такимъ образомъ уменьшивъ знаменатель въ правой части уравненія

$$[36] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad t = \frac{H}{W \times S \cdot H}$$

или примѣнивъ топливо съ большей тепловой производительностью, что можетъ повлечь за собою увеличеніе числителя или уменьшеніе знаменателя въ правой части указаннаго уравненія. Разумѣется, увеличеніе количества топлива не можетъ повлечь за собою повышенія температуры горѣнія, такъ какъ при этомъ въ одинаковой мѣрѣ увеличиваются какъ числитель, такъ и знаменатель въ правой сторонѣ уравненія [36].

Для того чтобы получать при помощи избытка топлива при сыромъ дутьѣ, когда разница между начальной температурой газа и критической температурой составляетъ 561°, столько же тепла, способнаго утилизироваться выше критической температуры, какъ и въ томъ случаѣ, когда эта разница составляетъ 665°, надо сжигать на одну тонну желѣза 665 ÷ 561, т. е. 1,19 разъ или на 19% больше топлива, чѣмъ при сухомъ дутьѣ. То обстоятельство, что эта величина совпадаетъ съ дѣйствительной экономіей топлива при процессѣ Gayley, разумѣется еще не служитъ указаніемъ на точность моихъ расчетовъ. Это совпаденіе чисто случайное. Мнѣ не составило бы никакого труда достигнуть такого мажущагося совпаденія путемъ подсчета.

Но необходимъ ли на самомъ дѣлѣ избытокъ топлива въ 19%? Для упрощенія дальнѣйшихъ разсужденій подраздѣлимъ тепло, развиваемое какъ избыткомъ топлива, такъ и тѣмъ топливомъ, которое мы можемъ назвать обычнымъ (т. е. тѣмъ количествомъ топлива, которое было бы необходимо и при сухомъ дутьѣ) на двѣ части, на тепло, соотвѣтствующее температурному интервалу между температурой горѣнія и 1300°, и тепло, соотвѣтствующее температурному интервалу между 1300° и 0°. Короче говоря, на тепло выше 1300° и тепло ниже 1300°. Газы,

образующіеся изъ избытка топлива, доставляющаго тепло, которое требуется выше 1300°, должны по охлажденіи съ 1861° до 1300°, т. е. на 561°, содержать еще въ 1300 ÷ 561 = 2,3 раза большее количество тепла, чѣмъ то количество тепла, которое они отдали выше 1300°.

Не будетъ ли часть этого тепла, ниже 1300°, улавливаться твердыми веществами въ верхней части печи, въ то время какъ газы подымаясь вверхъ, приходятъ съ ними въ соприкосновеніе? Кромѣ того не будетъ ли часть окиси углерода, развивающейся при сгораніи избытка топлива, окисляться въ углекислоту въ верхней части печи и, развивая при этомъ тепло, совершать полезную работу?

Повидимому, нѣтъ. Къ разсмотрѣнію этого вопроса можно подойти съ трехъ сторонъ. Во-первыхъ, окисляется ли часть избыточной окиси углерода въ углекислоту, и если окисляется, то совершается ли при этомъ полезная работа? Во-вторыхъ, большая ли часть тепла, доставляемаго избыткомъ топлива, можетъ быть утилизирована для критической работы выше 1300°? Въ-третьихъ, можно ли уловить и утилизировать ниже 1300° часть тепла, развиваемаго избыткомъ топлива?

На первый вопросъ придется отвѣтить, вѣроятно, отрицательно. Совершенно вѣрно, что въ то время, какъ газы поднимаются въ печи, значительное количество содержащейся въ нихъ окиси углерода окисляется въ углекислоту подъ вліяніемъ кислорода руды.

Но это количество на тонну руды совершенно опредѣленное. Тонна руды содержитъ совершенно опредѣленное количество кислорода, и послѣдній можетъ окислить только опредѣленное количество окиси углерода. Тѣмъ, что на тонну руды будетъ въ горнѣ сгорать больше топлива и что будетъ образовываться больше окиси углерода, мы ни на одинъ атомъ не можемъ повысить содержаніе кислорода въ рудѣ, а слѣдовательно и не можемъ усилить переходъ окиси углерода въ углекислоту. Такимъ образомъ, въ отношеніи дальнѣйшаго окисленія окиси углерода въ углекислоту твердые матеріалы ничего не могутъ дать.

Перейдемъ теперь ко второму вопросу. Изъ тепла выше 1300° только часть можетъ быть утилизирована для критической работы выше 1300°, потому что эта работа должна быть совершена въ очень ограниченной части печи, въ области наивысшей температуры. Черезъ эту область сильно расширенные газы проте-

каютъ съ огромной быстротой и не успѣваютъ отдать всего заключающагося въ нихъ тепла выше 1300°, подобно тому, какъ газы изъ топки достигаютъ аппаратовъ для подогрѣванія питающей котелъ воды, прежде чѣмъ они успѣютъ отдать котлу все свое тепло выше точки кипѣнія. Теперь намъ надо разрѣшить вопросъ, при какомъ дутьѣ, при сыромъ или сухомъ, утилизируется больше тепла для критической работы выше 1300°? Если при сыромъ дутьѣ утилизируется больше тепла, то необходимый избытокъ топлива долженъ составлять нѣсколько менѣе 19%; если же меньше, то необходимый избытокъ топлива долженъ превышать 19%.

Утилизація тепла при сыромъ дутьѣ должна быть меньше по двумъ очевиднымъ причинамъ. Во-первыхъ, передача тепла отъ газовъ къ твердымъ и расплавленнымъ тѣламъ, подвергающимся нагрѣванію (мы принимаемъ, что температура этихъ тѣлъ въ обоихъ случаяхъ одинакова), совершается медленнѣе, потому что температура горѣнія при сыромъ дутьѣ гораздо ниже, чѣмъ при сухомъ, а также потому, что чѣмъ меньше разница температуръ двухъ тѣлъ, тѣмъ медленнѣе совершается передача тепла отъ одного къ другому. Во-вторыхъ, промежутокъ времени, въ теченіе котораго должна произойти эта передача тепла, гораздо меньше въ случаѣ сырого дутья, потому что при послѣднемъ сжигается большее количество газовъ, которые вслѣдствіе этого должны болѣе быстро протекать черезъ горнъ. Низкая начальная температура этихъ газовъ и уравновѣшивается ихъ большимъ количеотвомъ.

Переходимъ теперь къ третьему вопросу. Первѣе всего бросается въ глаза тотъ фактъ, что даже при сухомъ дутьѣ газы, оставляющіе печь, обладаютъ высокой температурой. Это указываетъ на то, что опускающіяся въ печи твердыя тѣла не въ состояніи поглотить даже меньшаго количества тепла, которое заключается въ газахъ, образующихся при сухомъ дутьѣ, и которые къ тому же обладаютъ меньшимъ объемомъ и движутся съ меньшей скоростью. Если эти твердыя тѣла не въ состояніи поглотить нацѣло даннаго меньшаго количества тепла, то какимъ же образомъ они могутъ поглотить хотя бы часть того избытка тепла, который заключается въ большемъ объемѣ газовъ, развивающихся при сыромъ дутьѣ, въ особенности, если принять

во вниманіе, что они движутся съ большей скоростью? При сыромъ дутьѣ опускающіяся твердыя тѣла въ состояніи поглотить нѣкоторый избытокъ тепла въ силу того, что они содержатъ избытокъ кокса въ 19%, вводимый въ горнъ для того, чтобы компенсировать вліяніе, оказываемое съуженіемъ интервала между температурой горѣнія и критической температурой. Только вслѣдствіе того, что они содержатъ избытокъ кокса въ 19%, опускающіяся твердыя тѣла и обладаютъ повышенной способностью къ поглощенію тепла. Избытокъ тепла можетъ быть ими поглощенъ исключительно за счетъ нагрѣванія избытка кокса, который является источникомъ избыточнаго количества газа и вѣсъ котораго составляетъ только незначительную часть вѣса того избыточнаго газа, тепло котораго онъ долженъ поглотить. Это явленіе не составляетъ однако части полезной работы печи, которая направлена къ возстановленію желѣзной руды, кремнекислоты и окиси кальція, къ диссоціаціи извести и къ плавленію и перегрѣванію желѣза и шлака. Все, что можно сказать, это то, что часть тепла, развиваемаго избыткомъ топлива, можетъ быть использована для его нагрѣванія. Избытокъ же тепла, заключающійся въ продуктахъ горѣнія избытка топлива по охлажденіи ихъ до критической температуры, повидимому, не можетъ быть использованъ для полезной работы при процессѣ.

Короче говоря, мы не имѣемъ основанія полагать, что при сыромъ дутьѣ опускающіяся твердыя вещества въ состояніи уловить для полезной работы печи хотя бы часть избыточнаго тепла ниже 1300°, развиваемаго избыткомъ топлива, ибо противъ этого говоритъ тотъ фактъ, что даже при сухомъ дутьѣ газы, оставляющіе печь, обладаютъ высокой температурой. Такимъ образомъ, мы неизбѣжно приходимъ къ заключенію, во-первыхъ, что тотъ избытокъ топлива, который, повидимому, нуженъ при сыромъ дутьѣ, необходимъ на самомъ дѣлѣ; во-вторыхъ, что изъ всего тепла, развивающагося при горѣніи этого избытка топлива, можетъ быть использована только та часть, которая отвѣчаетъ съуженному интервалу между температурой горѣнія и критической температурой, а остатокъ частью расходуется на нагрѣваніе самаго кокса до критической температуры, частью же теряется.

Здѣсь ясно выступаетъ огромная разница между использованіемъ этого избыточнаго топлива и использованіемъ топлива при сухомъ дутьѣ. При послѣднемъ большая часть тепла, развиваемаго топливомъ, расходуется на полезную работу, на возстановленіе, подогрѣваніе, диссоціацію, плаваеніе и перегрѣваніе.

То, что̀ говорилось объ избыткѣ тепла, развиваемомъ избыткомъ топлива, который необходимъ для компенсаціи съуженія температурнаго интервала, равнымъ образомъ относится и къ избытку тепла, необходимому для компенсаціи тепла, расходуемаго на диссоціацію влаги.

Такимъ образомъ намъ, повидимому, удалось подтвердить тѣ три причины, обусловливающія экономію топлива при сухомъ дутьѣ, на которыя указывалось въ началѣ § 344.

Если нашъ разумъ, постоянно старающійся подыскать для каждаго крупнаго явленія крупной причины, не мирится съ тѣмъ, что удаленіе небольшого количества влаги изъ дутья влечетъ за собою при доменномъ процесѣ экономію въ топливѣ, составляющую 19%, то достаточно вспомнить случаи, указанные въ § 345. Вспомнимъ, что повышеніе температуры горѣнія съ 101° до 105°, или только на 4%, увеличиваетъ пропорцію тепла, которое можетъ быть использовано выше критической температуры кипѣнія воды, на 400%. Представимъ себѣ ручей, глубина котораго четыре фута, а уровень на одинъ дюймъ выше уровня сдерживающей его плотины. Повысимъ уровень ручья на 10%, или 4,8 дюйма, и количество переливающейся черезъ плотину воды увеличится на 480%. Представимъ себѣ пловца, который запутался ногами и ротъ котораго находится на дюймъ ниже поверхности воды. Для него, въ сущности, не составило бы разницы, если бы онъ былъ на сотню саженъ ниже. Дюймъ, отдѣляющій его отъ поверхности, составляетъ для него несравненно больше, чѣмъ нѣсколько саженъ, на которыя онъ передъ тѣмъ поднялся.

Отношеніе между начальной температурой, или температурой горѣнія, и критической температурой не обратило на себя до сихъ поръ надлежащаго вниманія, вѣроятно, потому, что интервалъ между ними въ большинствѣ процессовъ очень великъ и измѣненія въ его величинѣ не оказываютъ значительнаго вліянія. Насколько мнѣ извѣстно, первымъ, кто съ ясностью пока-

залъ значеніе критической температуры въ доменномъ процессѣ, былъ J. E. Johnson-младшій [1]).

Итакъ, мы разсмотрѣли, почему при примѣненіи сухого дутья получается экономія въ топливѣ, совершенно непропорціональная тому количеству тепла, которое нужно для нагрѣванія и диссоціаціи паровъ воды, заключающихся въ сыромъ дутьѣ, и почему происходитъ пониженіе температуры уходящихъ изъ домны газовъ. Совершенно тѣ же разсужденія примѣнимы и для объясненія, почему экономія въ топливѣ, вызываемая изобрѣтеннымъ Neilson'омъ горячимъ дутьемъ, и вообще всякимъ дальнѣйшимъ подогрѣваніемъ дутья, совершенно непропорціональна тому количеству тепла, которое сообщается дутью, и почему нагрѣваніе дутья тотчасъ сопровождается пониженіемъ температуры уходящихъ газовъ и повышеніемъ отношенія между углекислотой и окисью углерода.

Вышеизложенныя соображенія можно резюмировать слѣдующимъ образомъ:

Присутствіе паровъ воды въ дутьѣ не только требуетъ избытка топлива для доставленія тепла, необходимаго для ихъ нагрѣванія и диссоціаціи, но, понижая температуру, развиваемую горѣніемъ (все равно, какъ если бы охладить дутье или разбавить его азотомъ), съуживаетъ еще больше и безъ того узкій

---

[1]) «Notes on the Physical Action of the Blast-Furnace», «Trans. American Inst. Mining Engineers», появится, вѣроятно, въ т. XXXVI.

J. E. Johnson обратилъ мое вниманіе на значеніе этого вопроса за нѣсколько лѣтъ передъ опубликованіемъ, но не передъ изобрѣтеніемъ процесса Gayley. Въ настоящемъ изложеніи я постарался дать нѣсколько болѣе точное опредѣленіе критической температуры, чѣмъ это сдѣлалъ Johnson. Послѣдній опредѣляетъ критическую температуру, какъ такую, выше которой необходимо вести нѣкоторые процессы. При такомъ опредѣленіи этотъ терминъ приложимъ равнымъ образомъ и къ тѣмъ процессамъ, которые были мною названы не-критическими. Его разсужденія относительно важности критической температуры пріобрѣтаютъ доказательность только въ томъ случаѣ, если опредѣлять критическую температуру, какъ такую, при которой, или выше которой, потребленіе тепла больше, чѣмъ въ среднемъ при болѣе низкихъ температурахъ. Повидимому, онъ и имѣлъ въ виду это условіе.

Кромѣ того, я сдѣлалъ еще дальнѣйшій шагъ, показавъ, почему изъ всего количества тепла, развиваемаго избыткомъ топлива, можетъ быть использована, повидимому, только, та часть, которая соотвѣтствуетъ болѣе узкому интервалу между температурой горѣнія и критической температурой.

интервалъ между нею и критической температурой; выше же критической температуры для возмѣщенія тепла, поглощаемаго при плавленіи желѣза и шлака и, вѣроятно, при возстановленіи кремнекислоты и окиси кальція, требуется гораздо больше тепла, чѣмъ при болѣе низкихъ температурахъ.

Дальнѣйшее пониженіе температуры горѣнія и съуженіе интервала между нею и критической температурой въ разсмотрѣнномъ выше частномъ случаѣ происходило вслѣдствіе пониженія температуры дутья, вызываемаго тѣмъ обстоятельствомъ, что печи не были въ состояніи достаточно нагрѣть большого количества дутья, хотя не только количество газа, служащаго для ихъ нагрѣванія, повидимому, увеличилось, но и качество его повысилось (по всей вѣроятности, въ данномъ случаѣ, невыгодность съуженія интервала между температурой горѣнія и критической температурой можно было бы отчасти парализовать, увеличивъ размѣры печей для нагрѣванія дутья).

Если для компенсаціи съуженія интервала между температурой горѣнія и критической температурой прибѣгнуть къ увеличенію количества топлива, то, очевидно, что только часть его, соотвѣтствующая этому болѣе узкому интервалу, можетъ быть использована. Остальная же часть тепла, развиваемаго избыткомъ топлива, которая соотвѣтствуетъ температурѣ ниже указаннаго интервала, едва ли можетъ быть использована при помощи твердыхъ, опускающихся въ печи, матеріаловъ. Точно также, едва ли окись углерода, развивающаяся изъ избытка топлива, можетъ быть при помощи этихъ твердыхъ матеріаловъ превращена въ углекислый газъ, ибо даже при горячемъ сухомъ дутьѣ способность ихъ къ поглощенію тепла и къ окисленію окиси углерода въ углекислый газъ оказывается вполнѣ исчерпанной. Такимъ образомъ, при влажномъ дутьѣ въ уходящихъ изъ печи газахъ должно содержаться больше тепла и большее количество окиси углерода, чѣмъ при сухомъ. При влажномъ дутьѣ количество окиси углерода въ уходящихъ газахъ должно быть больше еще и потому, что, благодаря ихъ болѣе высокой температурѣ, содержащійся въ нихъ углекислый газъ энергичнѣе вступаетъ во взаимодѣйствіе съ поступающимъ въ печь углемъ, образуя окись углерода, а это обстоятельство, въ свою очередь, вызываетъ большій расходъ топлива, такъ

какъ та часть угля, которая уносится при этой реакціи въ видѣ окиси углерода, должна быть возмѣщена.

Но съуженіе интервала между температурой горѣнія и критической температурой имѣетъ еще одну невыгодную сторону. Даже та часть тепла, которая отвѣчаетъ болѣе узкому интервалу, не можетъ быть вполнѣ использована для критической работы, ибо, во-первыхъ, благодаря болѣе низкой температурѣ, газы менѣе быстро отдаютъ свое тепло твердымъ и расплавленнымъ веществамъ, а во-вторыхъ, благодаря своему большему вѣсу, слѣдовательно и объему, они должны проходить съ большей скоростью черезъ печь. Передача тепла происходитъ медленнѣе, а вмѣстѣ съ тѣмъ время для передачи короче.

Можно ожидать выгоды отъ всякаго дальнѣйшаго шага, направленнаго къ увеличенію интервала между температурой горѣнія и критической температурой, какъ, напримѣръ, отъ дальнѣйшаго повышенія температуры дутья или отъ удаленія изъ него азота.

348) Нѣсколько замѣчаній относительно сорбита и другихъ переходныхъ ступеней между аустенитомъ и перлитомъ.— Большую твердость мартенсита по сравненію съ аустенитомъ въ гиперэвтектоидной стали можно объяснить, съ одной стороны, присутствіемъ въ мартенситѣ бэта-желѣза, съ другой чисто механически, ибо при этомъ превращеніи въ аустенитѣ прежде всего образуется цементитъ, гораздо болѣе твердый, чѣмъ аустенитъ.

Мы знаемъ, что 1) мартенситъ обыкновенно образуется вдоль плоскостей спайности аустенита и, повидимому, способствуетъ сохраненію послѣднимъ игольчатаго строенія; 2) что троститъ рѣзко отличается отъ мартенсита, и 3) что между трооститомъ, сорбитомъ и перлитомъ нѣтъ рѣзкихъ переходовъ. Всѣ эти факты можно объяснить какъ съ той, такъ и съ другой изъ указанныхъ выше точекъ зрѣнія, хотя второй фактъ говоритъ за существенное различіе между этими переходными степенями, а третій за количественное различіе.

Сорбитъ можетъ быть полученъ различными путями, причемъ для его образованія требуется, чтобы превращеніе произошло до значительной степени, но не дошло до конца. Такъ, сорбитъ получается при закалкѣ стали въ маслѣ. Въ маслѣ охлажденіе происходитъ настолько медленно, что превращеніе

заходитъ далѣе переходной стадіи мартенсита, получающагося при закалкѣ стали въ водѣ, но въ то же время не успѣваетъ достигнуть стадія перлита, характеризующей медленно охлажденную сталь.

Другой методъ полученія сорбита состоитъ въ томъ, что медленно охлаждаютъ сталь на извѣстномъ промежуткѣ критическаго интервала въ области V и VII и даютъ превращенію отчасти произойти, а затѣмъ ее закаливаютъ въ водѣ. Наконецъ, сорбитъ получается также при нагрѣваніи, т. е. отпускѣ, почти до A_1, закаленной въ водѣ стали.

УКАЗАТЕЛЬ.